



# CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS PRODUZIDOS POR FABRICO ADITIVO, SUBMETIDOS A MÉDIAS E ELEVADAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO

GONÇALO FREITAS MONTEIRO

outubro de 2023

# CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS PRODUZIDOS POR FABRICO ADITIVO, SUBMETIDOS A MÉDIAS E ELEVADAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO

Gonçalo Freitas Monteiro, Nº 1210198

Mestrado em Engenharia Mecânica – Construções Mecânicas

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS PRODUZIDOS POR FABRICO ADITIVO, SUBMETIDOS A MÉDIAS E ELEVADAS TAXAS DE DEFORMAÇÃO

Gonçalo Freitas Monteiro

Nº - 1210198

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Hernâni Lopes e do Doutor Gonçalo Cipriano.

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **AGRADECIMENTOS**

Desejo expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todas aquelas pessoas, ou instituições, que contribuíram e possibilitaram a realização desta dissertação. Sem deixar de parte aqueles que me apoiaram com um simples gesto ou palavra amiga gostaria, no entanto, de agradecer especialmente a algumas pessoas que tiveram um papel importante na realização da mesma.

Ao Doutor Hernâni Lopes, orientador desta dissertação, pelo valioso conhecimento científico transmitido, pelas críticas pertinentes, pelas palavras encorajadoras e pela total disponibilidade ao longo de todo o trabalho.

Ao Doutor Gonçalo Cipriano, coorientador desta dissertação, pelo seu apoio, orientação cuidadosa e experiência valiosa no esclarecimento de dúvidas. Adicionalmente pelo acompanhamento e auxílio na realização dos ensaios na instituição INEGI.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus pais por todas as palavras de apoio e encorajamento e com especial atenção à minha avó por sempre acreditar em mim, à minha namorada pelo valioso apoio e palavras em todos os momentos mais exigentes e aos meus amigos sempre presentes durante o percurso académico.

The authors acknowledge the project POCI- 01-0247-FEDER-072260, financed by European Funds, through program COMPETE2020, under the Eureka smart label S0318-STREAM -Surface Treatment for Additive Manufacturing.



## RESUMO

O fabrico aditivo de componentes tem-se tornado num campo de pesquisa muito importante, motivado pela possibilidade de criar geometrias inovadoras e de combinar diferentes materiais. Trata-se de uma tecnologia de fabrico muito recente pelo que é escassa a informação sobre o comportamento mecânico destes novos componentes, principalmente no que se refere ao seu comportamento dinâmico.

O presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização experimental do comportamento a elevadas taxas de deformação de provetes em alumínio AlSi10Mg obtidos por fabrico aditivo de fusão seletiva por laser (SLM), função da direção de fabrico dos provetes e da aplicação de tratamento térmico de revenido. Os ensaios de tração foram realizados na barra de Hopkinson existente nas instalações do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) e envolvem o registo das ondas de deformação geradas nas barras pelo impacto e a recolha de imagens de alta-velocidade da superfície do provete. A partir do registo das ondas incidente, transmitida e refletida são extraídas as curvas tensão-deformação. Neste trabalho, os sinais no tempo foram filtrados com o objetivo de reduzir o ruído experimental e, assim, melhorar a qualidade das curvas tensão-deformação. As imagens de alta-velocidade são pós-processadas para a determinação do campo de deformações no provete, tendo-se, para esse efeito, gravado previamente na superfície do provete um padrão de *speckle*.

Os gráficos tensão-deformação mostram que o comportamento dos provetes é fortemente dependente da direção da deposição do material. Nos provetes submetidos a tratamento térmico de revenido verificou-se uma ligeira redução na tensão máxima e um aumento geral na deformação até rutura, relativamente aos provetes não tratados. A partir da energia elasto-plástica verificou-se que os provetes fabricados na direção transversal possuem um valor mais elevado e que este melhora com o tratamento térmico de revenido.

## PALAVRAS-CHAVE

Fabrico aditivo; Barra de Hopkinson; Correlação de imagem digital; Curva de tensão-deformação; Campo de deformações



## ABSTRACT

Additive manufacturing of components has become a very important field of research, motivated by the possibility of creating innovative geometries and combining different materials. This is a very recent manufacturing technology, so there is little information on the mechanical behavior of these new components, especially concerning their dynamic behavior.

The main objective of the present work is to experimentally characterize the behavior at high deformation rates of AlSi10Mg aluminum test pieces, obtained by additive manufacturing of selective laser melting (SLM), as a function of their manufacturing direction and the application of heat tempering treatment. The tensile tests are carried out on the Hopkinson bar at the facilities of the Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering (INEGI) and involve recording the deformation waves generated in the bars by the impact and collecting high-speed images of the surface specimens. From the recording of the incident, the transmitted and the reflected waves, the stress-strain curves are extracted. In this work, time signals were filtered to reduce experimental noise and, thus, improve the quality of the stress-strain curves. The high-speed images are post-processed to determine the deformation field in the specimen, having, for this purpose, previously recorded a Speckle pattern on the surface of the specimen.

The stress-strain curves show that the behavior of the specimens is strongly dependent on the direction of their manufacture. In specimens subjected to tempering heat treatment, there was a slight reduction in maximum stress and a general increase in deformation until failure, compared to untreated specimens. From elastoplastic energy, it was found that specimens manufactured in the transverse direction have a higher value and that this improves with the tempering heat treatment.

## KEYWORDS

Additive manufacturing; Hopkinson Bar; Digital image correlation; Stress-strain curve; Deformation full field.



# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Contextualização .....	15
1.2. Objetivos .....	16
1.3. Metodologia .....	16
1.4. Estrutura do relatório.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Caracterização dos materiais a elevadas taxas de deformação.....	19
2.2. Introdução aos processos de fabrico aditivo .....	20
2.2.1. <i>Powder bed fusion</i> (Fusão por Cama de Pó) .....	20
2.2.2. Binder Jetting .....	21
2.2.3. <i>Direct Energy Deposition</i> (deposição por energia direcionada) .....	22
2.2.4. <i>Sheet Lamination</i> (Laminação de folhas).....	22
2.2.5. Análise Comparativa dos Vários Processos.....	23
2.2.6. Tecnologia de Fusão Seletiva por Laser (SLM).....	25
2.3. Introdução à Barra de Hopkinson .....	27
2.3.1. Evolução Histórica da Barra de Hopkinson .....	27
2.3.2. Barra de Hopkinson para ensaios à compressão .....	28
2.3.3. Barra de Hopkinson para ensaios à tração .....	30
2.3.4. Propagação de Ondas Elásticas em Barras Cilíndricas .....	34
2.3.5. Impedância Mecânica .....	35
2.4. Técnica de correlação Digital de Imagem .....	36
2.4.1. Procedimento de medição.....	37
2.4.2. Criação do padrão de <i>speckle</i> . .....	39
2.4.3. Sistema de aquisição de imagem.....	40
2.4.4. Determinação dos campos de deslocamentos e deformações .....	41
3. Ensaio Experimentais.....	45
3.1. Preparação dos provetes.....	45
3.1.1. Fabrico dos provetes em alumínio AlSi10Mg.....	45
3.1.2. Gravação do padrão de <i>speckle</i> .....	47
3.2. Montagem experimental.....	49
3.2.1. Descrição do ensaio da tração na barra de Hopkinson.....	49
3.2.2. Instrumentação da barra e pós-processamento dos sinais .....	50
3.2.3. Aquisição de imagens a alta velocidade .....	53
3.2.4. Determinação dos campos de deslocamentos e deformações pela técnica DIC-2D.....	55

---

3.2.5. Procedimento para os ensaios de tração na barra de Hopkinson .....	56
4. Apresentação e discussão de resultados .....	57
4.1. Correção dimensional dos provetes e caracterização dos parâmetros do ensaio da técnica de DIC.....	57
4.2. Resultado dos ensaios .....	61
4.2.1. Avaliação do efeito da direção de fabrico e do tratamento térmico.....	62
4.2.2. Campos de deslocamentos e deformações obtidos pela técnica DIC .....	65
4.2.3. Comparação de resultados entre as duas técnicas.....	66
5. CONCLUSÃO .....	69
5.1. Proposta de trabalhos futuros .....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71
6. Anexos.....	75
6.1. Anexo 1 – Dimensões dos Provetes para ensaio na Barra de Hopkinson .....	75
6.2. Anexo 2 – Imagens de todos os provetes ensaiados.....	76
6.3. Anexo 3 – Código MATLAB® referente ao programa de filtragem dos dados .....	82
6.4. Anexo 4 – Código MATLAB® referente ao programa do cálculo da energia elasto-plástica.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do processo de <i>powder bed fusion</i> (adaptado de [9]).....	21
Figura 2 - Esquema representativo do processo de <i>binder jetting</i> (adaptado de [9]).....	21
Figura 3 - Esquema típico de um processo de deposição por energia direcionada (adaptado de [9]) .....	22
Figura 4 - Esquema representativo do processo de <i>sheet lamination</i> (adaptado de [9]).....	23
Figura 5 - Esquema representativo do processo de fusão seletiva por laser (adaptado de [23]) ...	26
Figura 6 - Barra de Hopkinson para realização de ensaios à compressão (adaptado de [1]) .....	28
Figura 7 - Diagrama de Lagrange referente ao registo temporal das deformações geradas pelas ondas incidente, refletida e transmitida na barra de Hopkinson à compressão [1] .....	30
Figura 8 - Barra de Hopkinson para realização de ensaios à tração (adaptado de [1]) .....	31
Figura 9 - Diagrama de Lagrange sobre o registo temporal das deformações geradas pelas ondas incidente, refletida e transmitida na barra de Hopkinson à tração, por embate de uma barra de impacto tubular [1] .....	32
Figura 10 - Diagrama de Lagrange sobre o registo temporal das deformações geradas pelas ondas incidente, refletida e transmitida na barra de Hopkinson à tração, provete com casquilho e reflexão do impulso incidente no extremo livre [1].....	33
Figura 11 - Análise das forças geradas num elemento infinitesimal de barra devido à propagação de ondas axiais de compressão, (a) antes do impacto, (b) depois do impacto e (c) forças a atuar no elemento infinitesimal, (adaptado de [28]) .....	34
Figura 12 - Representação esquemática de um sistema de DIC-2D (adaptado de [62]) .....	38
Figura 13 - Exemplos de padrões de <i>speckle</i> adequados e inadequados (adaptado de [62]) .....	39
Figura 14 - Montagem experimental para a medição dos campos de deslocamento e deformações gerado numa barra de Hopkinson (adaptado de [28]) .....	40
Figura 15 - Representação da evolução das deformações no <i>subset</i> (adaptado de [73]) .....	41
Figura 16 - Deformações de um <i>subset</i> (adaptado de [71]).....	42
Figura 17 - a) Mapa de intensidade de um <i>subset</i> ; b) campo de intensidade interpolada pela função <i>spline</i> bilinear; c) campo de intensidade interpolada pela função <i>spline</i> cúbica (adaptado de [72]) .....	43
Figura 18 - Máquina utilizada no fabrico dos provetes Renishaw®, modelo AM400 .....	45
Figura 19 - Imagem dos provetes fabricados e respetivas dimensões. A seta a vermelho indica a direção de fabrico longitudinal (L), a seta a verde indica a direção de fabrico transversal (T) e por fim a seta a azul indica a direção de fabrico vertical (V).....	46
Figura 20 - Interface do programa de criação do padrão de <i>speckle</i> .....	48
Figura 21 - Várias etapas do processo de gravação do padrão de <i>speckle</i> na superfície dos provetes .....	49
Figura 22 - Apoios das barras em teflon preparado com canais para passagem de ar comprimido	50
Figura 23 - <i>Pressure booster</i> , melhoria introduzida no sistema para permitir aumentar a pressão do sistema .....	50
Figura 24 - Osciloscópio de quatro canais da Pico Technology®, modelo 4424 .....	51
Figura 25 - Introdução das características da barra no programa Surepulse® da empresa Relinc Inc® .....	52

Figura 26 - Apresentação das curvas de resultados através do programa Surepulse® da empresa Relinc Inc® .....	52
Figura 27 - Imagem da montagem experimental para o ensaio à tração de provetes em alumínio: (1) Barra de Hopkinson; (2) Iluminação GSVITEC MultiLed QT; (3) Lente Nikon AF Micro Nikkor 60mm f/2.8 D; (4) Câmara de alta-velocidade Photron FastCam Nova-S.....	53
Figura 28 - Campo de visão da câmara de alta-velocidade do provete antes e após o ensaio. ....	54
Figura 29 - Processamento das imagens de alta-velocidade no programa Gom Correlate®.....	55
Figura 30 - Criação do extensómetro virtual e obtenção da curva Extensão-Tempo.....	56
Figura 31 - Regiões do provete submetidas à correção dimensional, através do desbaste por abrasão .....	57
Figura 32 - Curva tensão-deformação antes e após a filtragem dos sinais.....	61
Figura 33 - Curva tensão-deformação que evidencia o fenómeno de aumento de rigidez local entre o provete e amarra .....	62
Figura 34 - Tensão-Deformação para os provetes com direção de fabrico Longitudinal, com e sem tratamento térmico .....	63
Figura 35 - Tensão-Deformação para os provetes com direção de fabrico Transversal, com e sem tratamento térmico .....	63
Figura 36 - Tensão-Deformação para os provetes com direção de fabrico Vertical, com e sem tratamento térmico .....	63
Figura 37 - Representação do campo de deformações determinado através da técnica DIC e para diferentes instantes: (a) e (e) início do ensaio, (b) e (f) antes da rotura, (c) e (g) durante a rotura, (d) e (h) após a rotura .....	65
Figura 38 - Comparação das curvas deformação-tempo obtidas por extensometria e pela técnica DIC.....	66
Figura 39 - Desenho técnico dos provetes utilizados nos ensaios da Barra de Hopkinson (desenho fornecido pelo INEGI).....	75
Figura 40 - Imagens dos provetes Verticais após o ensaio .....	76
Figura 41 - Imagens dos provetes Verticais Tratados após o ensaio .....	77
Figura 42 - Imagens dos provetes Transversais após o ensaio .....	78
Figura 43 - Imagens dos provetes Transversais Tratados após o ensaio .....	79
Figura 44 - Imagens dos provetes Longitudinais após o ensaio.....	80
Figura 45 - Imagens dos provetes Longitudinais Tratados após o ensaio.....	81

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de fabrico aditivo em metal.....	23
Tabela 2- Vantagens e desvantagens da técnica de DIC. ....	37
Tabela 3 - Desvios médios por subgrupo de provetes relativamente às dimensões de projeto. ....	47
Tabela 4 - Número de provetes ensaiados para cada direção de fabrico e função do tratamento térmico.....	58
Tabela 5 - Casos distintos de fraturas obtidas durante o ensaio de tração.....	59
Tabela 6 - Parâmetros selecionados na barra de Hopkinson e para o sistema de captura de imagens no decorrer dos ensaios de todos os provetes.....	59
Tabela 7 - Valores médios da energia elasto-plástica para as três direções de fabrico dos provetes, com e sem tratamento térmico .....	64



## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

1D	Unidimensional
2D	Duas Dimensões
3D	Tridimensional
3DP	Impressão Tridimensional
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided-Design</i>
$CO_2$	Dióxido de Carbono
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DIC – 2D	Correlação de Imagem Digital para medições no plano
DIC – 3D	Correlação de Imagem Digital para medições no espaço
EUA	Estados Unidos da América
FA	Fabrico Aditivo
FPS	<i>Frames per second</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NCC	<i>Normalized Cross Correlation</i>
NSSD	<i>Normalized Sum of Squared Differences</i>
P. Porto	Instituto Politécnico do Porto
SHPB	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>
SLM	Fusão Seletiva por Laser
SSD	<i>Sum of Squared Differences</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
UMAI	Unidade de Monitorização Avançada e Integridade Estrutural
VIC	Correlação de Imagem Digital para medições volumétricas
ZNSSD	<i>Zero-Mean Normalized Sum of Squared Differences</i>
ZSSD	<i>Zero-Mean Sum of Squared Differences</i>

## Lista de Símbolos

$A$	Área de secção
$c_o$	Velocidade de propagação de onda em meios contínuos unidireccionais, estado uniaxial de tensão em barras esbeltas
$F$	Função intensidade de referência
$G$	Função intensidade deformada
$GPa$	Giga Pascal
$\bar{F}\bar{G}$	Valores médios das intensidades
$i$	$=\sqrt{-1}$ unidade imaginaria
$J$	Joules
$L, li$	Comprimento
$m$	Massa
mm	Milímetros
$MPa$	Mega Pascal
$n$	Número de pixels de cada grão
$p$	Dimensão individual do pixel na camara
$s$	Segundos
$t$	Tempo
$T$	Temperatura
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_I(t)$	Onda incidente
$\varepsilon_R(t)$	Onda refletida
$\varepsilon_T(t)$	Onda transmitida
$\varepsilon_{xx}$	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo $xx$
$\varepsilon_{yy}$	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo $yy$
$f_l$	Distancia focal da Lente
$\gamma_{xy}$	Deformação de corte ou distorção de $xy$
$\rho$	Densidade
$\sigma$	Tensão normal
$\Omega$	Ohms
$\tau$	Tensão de corte
$u$	Translação no eixo das abcissas
$u(t)$	Deslocamento na Direção Longitudinal da Barra
$v$	Translação no eixo das ordenadas
$v_p$	Velocidade das Partículas
$x$	Coordenada cartesiana das abcissas de referência
$X$	Valor da função objetivo
$x'$	Coordenada cartesiana das abcissas deformada
$y$	Coordenada cartesiana das ordenadas de referência
$\mu m$	Micron

---

$y'$	Coordenada cartesiana das ordenadas deformada
$Z$	Impedância mecânica

---



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A tecnologia de fabrico aditivo de elementos metálicos tem apresentado um forte desenvolvimento nas últimas décadas, motivado pelas capacidades de fabrico de peças com novas geometrias e de combinar diferentes materiais, os quais não seriam possíveis de obter pelos processos de fabrico convencionais. Através desta tecnologia é possível reduzir os tempos de projeto e de fabrico, pela eliminação de um conjunto de etapas, e reduzir o desperdício de material através do reaproveitamento do material em bruto.

O processo de fabrico aditivo baseia-se na sucessiva agregação de partículas metálicas através da sua fusão, por aplicação de uma fonte de energia concentrada ou por adição de um ligante, normalmente resina polimérica. Como tal, as propriedades mecânicas das peças obtidas são distintas das fabricadas pelos processos convencionais, pelo que estas devem ser identificadas através da realização de ensaios normalizados. Neste âmbito, destaca-se a caracterização do seu comportamento dinâmico na presença de solicitações a médias e elevadas taxas de deformação. O dispositivo mais conhecido/usado na caracterização dinâmica de materiais é a Barra de Hopkinson. Este dispositivo permite obter a curva de tração-deformação para diferentes taxas de deformação e para diferentes tipos de solicitação, como: tração, compressão e flexão em três pontos, etc.

As técnicas de metrologia ótica vieram permitir a medição do campo de deformações em estruturas. Pela sua simplicidade e elevada flexibilidade, a técnica de correlação digital de imagem (DIC) é atualmente a técnica mais usada na avaliação do comportamento estático e dinâmico de estruturas. Esta baseia-se no seguimento de padrões de *speckle* entre diferentes registos de imagem, obtidas durante a deformação da estrutura. Por outro lado, o desenvolvimento de câmaras de alta-velocidade tornou possível o registo de fenómenos cada vez mais rápidos. Principalmente na última década, estas câmaras têm sido combinadas com a barra de Hopkinson para a medição do campo de deformações em materiais submetidos a elevadas taxas de deformação, com o fim de se obter uma caracterização mais detalhada do seu comportamento.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a caracterização do comportamento do alumínio AlSi10Mg produzido por fabrico aditivo quando submetido a médias e elevadas taxas de deformação. A partir destes pretende-se avaliar a influência da direção de impressão e do tratamento térmico de revenido realizado após o seu fabrico. Os ensaios serão realizados na barra de Hopkinson com o objetivo de obter as curvas tensão-deformação do comportamento global do material. Adicionalmente será realizada uma análise mais detalhada do comportamento destes materiais através da medição do campo de deformações na superfície dos provetes, através da técnica de correlação digital de imagem. Para tal, serão recolhidas imagens de alta-velocidade de padrões de *speckle* previamente gravados na superfície dos provetes.

## 1.3. Metodologia

- Numa primeira fase foi definido o projeto e planeadas as atividades a desenvolver a fim de alcançar os objetivos propostos para o trabalho.
- Após a conclusão da primeira fase, foi efetuada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de reunir os principais artigos e documentos científicos, fundamentais para aprofundar os conhecimentos técnicos e científicos necessários ao desenvolvimento do trabalho.
- Na fase seguinte, iniciou-se os preparativos para a realização dos ensaios experimentais. Este envolveu o fabrico dos provetes, a análise e correção da sua geometria e a gravação na superfície do padrão de *speckle* necessário à realização da medição do campo de deformações com a técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC). Foi igualmente preparada toda a montagem experimental, a qual envolveu o ajuste e calibração da barra de Hopkinson, do sistema de iluminação e da câmara de alta-velocidade.
- Por fim, foram realizados os ensaios experimentais e recolhidas e processadas as informações. Seguiu-se a análise crítica dos resultados obtidos, a partir dos quais foram retiradas as conclusões.

## 1.4. Estrutura do relatório

Este relatório está organizado em cinco capítulos, sendo que cada um aborda diferentes temas considerados relevantes para alcançar os objetivos propostos.

No capítulo 1 é apresentada a contextualização aos materiais obtidos por fabrico aditivo e a relevância para a caracterização do seu comportamento a elevadas taxas de deformação. Em seguida, são apresentados os principais objetivos deste trabalho e descrita a metodologia para os alcançar. O capítulo termina com a apresentação da estrutura da dissertação e com a descrição dos temas abordados em cada capítulo.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos considerados fundamentais para o desenvolvimento do trabalho experimental. Este inicia-se com a descrição dos principais processos de fabrico aditivo metálicos, com destaque para o processo de fusão seletiva por laser (SLM) que será usado no fabrico dos provetes a ensaiar. É apresentada a barra de Hopkinson e o seu princípio de funcionamento, são descritos os principais ensaios e os parâmetros que permitem controlar a taxa de deformação gerada. Por fim, são apresentados os fundamentos do método de correlação digital de imagem, o qual será usado na medição do campo de deformações nos provetes.

No capítulo 3 é descrito o trabalho preparatório para a realização dos ensaios experimentais. Começa por apresentar a máquina SLM e o processo de fabrico dos provetes em alumínio. Segue-se a descrição da técnica de gravação do padrão de *speckle* na superfície dos provetes, a instrumentação da barra de Hopkinson, pós-processamento dos sinais, e a montagem experimental para a recolha das imagens de alta-velocidade. Este termina com a apresentação do procedimento que irá ser seguido na realização dos ensaios experimentais.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios por ambas as técnicas. É analisada a influência na curva tensão-deformação devido à direção de fabrico do provete e do tratamento térmico de revenido. Termina com a comparação das curvas deformação-tempo medidas com as duas técnicas.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais do presente trabalho e propostas linhas de pesquisa futuras.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Caracterização dos materiais a elevadas taxas de deformação

A caracterização do comportamento dinâmico dos materiais tem sido alvo, nos últimos anos, de vários estudos devido ao interesse no desenvolvimento de novas e mais sofisticadas máquinas e equipamentos. No entanto, o seu comportamento a elevadas taxas de deformação ainda é um assunto que apresenta algumas lacunas no nosso conhecimento. Um dos primeiros ensaios experimentais a ser realizado para a caracterização dos materiais a elevadas taxas de deformação foi na barra de Hopkinson [1]. Este ensaio é habitualmente utilizado no estudo de materiais metálicos, como alumínio, aço e titânio [2]. Mais recentemente, esta técnica tem sido usada no estudo e caracterização do comportamento de materiais obtidos por fabrico aditivo. Neste trabalho dar-se-á destaque à técnica de fusão seletiva por laser (SLM), dado que os provetes a ensaiar serão fabricados através desta técnica. Refira-se que o estudo do comportamento dos materiais fabricados através destas técnicas é muito recente e, por esse motivo, há escassez de informação científica que permita identificar a influência da direção de impressão e do tratamento térmico. Ming et al. comparou as propriedades dinâmicas da liga de titânio Ti6Al4V obtidas por forjamento e por SLM, verificando de não existem diferenças significativas entre os dois processos. No entanto, destaca que as peças obtidas por SLM apresentam uma maior estabilidade e um melhor acabamento no processo de fresagem para velocidades de corte 80m/min [3]. No trabalho realizado por Ponnusamy et al. é caracterizado o comportamento dinâmico do alumínio AlSi12 obtido por SLM, através da realização de ensaios à temperatura ambiente e a altas temperaturas, fazendo variar orientação de fabrico dos provetes [4]. No seu estudo concluiu que os provetes fabricados verticalmente apresentavam maior resistência mecânica em comparação com as outras orientações. Wang et al. estudaram a energia absorvida e o modo de colapso de estruturas inspiradas pela natureza e fabricadas por SLM em liga de alumínio AlSi10Mg [5]. Os ensaios de compressão foram realizados na barra de Hopkinson e foi usada a técnica de correlação digital de imagem para avaliar o campo de deformação durante o ensaio de compressão. Concluíram que as estruturas inspiradas na natureza são muito sensíveis à taxa de deformação e que as simulações numéricas conseguem reproduzir com elevada proximidade as medições experimentais. As propriedades compressivas do Ti-6Al-4 V fabricado por SLM foram analisadas às taxas de deformação e temperaturas 2000–6000/s e 25–650 °C, respetivamente [6]. Este estudo serviu para criar uma base teórica sobre a deformação e o comportamento dinâmico do material.

No âmbito deste trabalho irá combinar-se o ensaio na barra de Hopkinson com a técnica de correlação digital de imagem, com o objetivo de obter-se uma melhor caracterização do comportamento dinâmico dos materiais obtidos por SLM. A partir deste, pretende-se avaliar a influência no comportamento da direção de fabrico dos provetes e do tratamento térmico aplicado após o seu fabrico. Este trabalho será realizado na Unidade de Monitorização Avançada e Integridade Estrutural (UMAI), pertencente ao Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), dada a sua longa experiência na realização deste tipo de ensaios e disponibilidade de meios.

## 2.2. Introdução aos processos de fabrico aditivo

O fabrico aditivo (FA) é um termo habitualmente usado para descrever o processo de fabrico de peças por adição de material camada-por-camada, popularmente designado de impressão tridimensional (3D). O crescente interesse por este processo de fabrico conduziu ao desenvolvimento de soluções comerciais, principalmente nas duas últimas décadas. Inicialmente, o processo era usado para o fabrico de protótipos, principalmente quando apresentavam uma geometria complexa e/ou um custo de produção substancialmente superior em comparação com os métodos convencionais de fabrico. A evolução tecnológica conduziu à redução de custos de fabrico, permitindo a produção de pequenas séries através deste processo [7].

Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), os processos de FA para metais podem ser divididos em 4 categorias, sendo estes designados por: *powder bed fusion* (fusão por cama de pó), *binder jetting* (BJ), *direct energy deposition* (DED), (deposição por energia direcionada) e *sheet lamination* (laminação de folhas) [8]. Estes englobam diferentes tecnologias de fabrico, as quais se distinguem pela taxa de produção, precisão, complexidade geométrica e custos [8].

### 2.2.1. *Powder bed fusion* (Fusão por Cama de Pó)

O processo de *powder bed fusion*, desenvolvido na universidade do Texas em Austin, EUA esteve entre os primeiros processos de fabrico aditivo a serem comercializados [9]. Todas as tecnologias associadas a este processo partilham um conjunto básico de características, como uma ou mais fontes térmicas, preferencialmente lasers, um método de controlo de fusão em zonas específicas e um mecanismo de deposição e nivelamento das camadas. O fabrico da peça é realizado camada-a-camada, numa câmara fechada e em ambiente controlado, habitualmente através do enchimento da câmara por um gás inerte (Azoto, Argon), com o objetivo de minimizar a oxidação do pó metálico. Na figura 1 apresenta-se um esquema representativo do processo *powder bed fusion*. Este inicia-se com a deposição de uma camada fina de pó metálico, normalmente entre 0,075 mm e 0,1 mm de espessura, e respetivo nivelamento com um rolo [9]. Em seguida, através de um feixe laser  $CO_2$  é fundido o pó metálico em regiões específicas, definidas em função da geometria da peça a fabricar. Para a adição de uma nova camada à peça, a plataforma de construção é rebaixada, repetindo-se o processo descrito anteriormente, sendo o número de camadas definido em função da altura da peça. Para reduzir a potência requerida do feixe laser e minimizar as distorções geométricas na peça, o pó metálico e a plataforma de construção são habitualmente pré-aquecidos. O pó metálico não fundido e que envolve a peça, serve também de suporte às camadas superiores, podendo no final ser retirado e reutilizado [9].

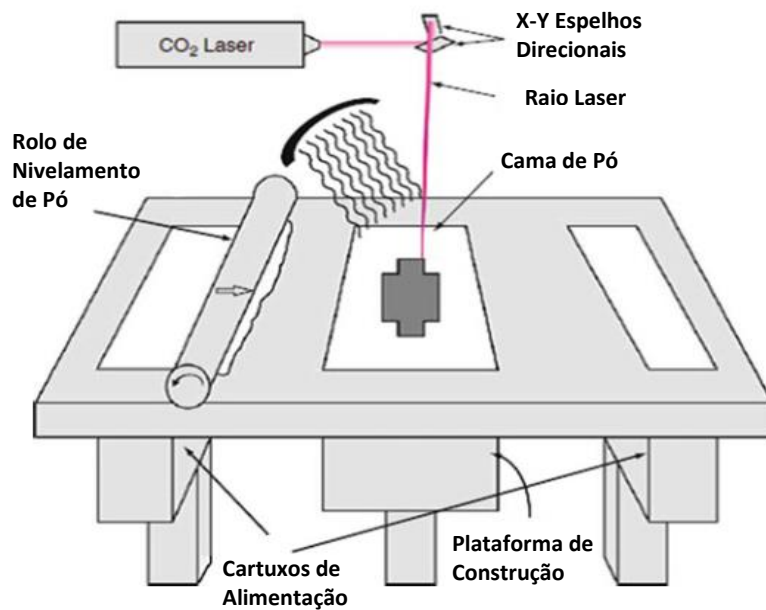


Figura 1 - Esquema representativo do processo de *powder bed fusion* (adaptado de [9])

### 2.2.2. Binder Jetting

O processo *Binder Jetting* (BJ) foi inicialmente desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT) que o designou inicialmente de impressão tridimensional. As peças são produzidas por deposição de ligante sobre diferentes camadas de pó metálico [9]. Na Figura 2 é apresentado um esquema do processo de fabrico por BJ. O pó metálico é depositado na plataforma de construção e nivelado através de um rolo [10]. O ligante é depositado na forma de gotas em regiões específicas através de uma cabeça de impressão. O seu diâmetro de 80  $\mu\text{m}$  permite ligar as partículas da camada depositada à peça já formada. O processo repete-se com o rebaixo da plataforma de construção e a deposição de nova camada de pó metálico. Após a impressão, é necessário deixar a peça repousar para que o ligante se fixe ao pó metálico e cure completamente.

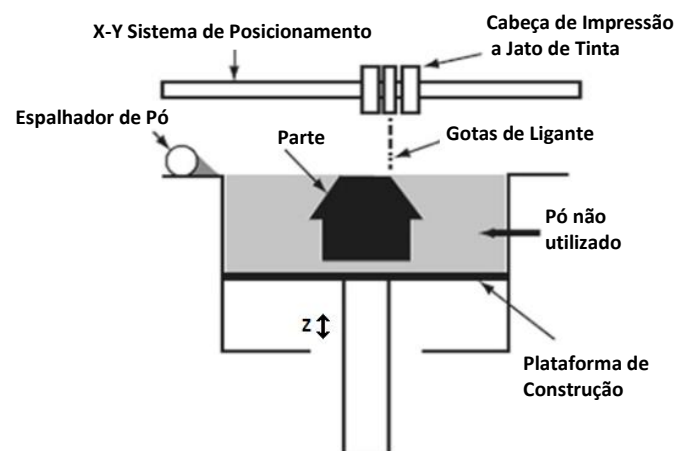


Figura 2 - Esquema representativo do processo de *binder jetting* (adaptado de [9])

### 2.2.3. *Direct Energy Deposition* (deposição por energia direcionada)

Tecnologia designada de “deposição de metais” é frequentemente utilizado para descrever o processo de *Direct Energy Deposition* (DED). Apesar deste poder ser aplicado no fabrico de partes com polímeros e cerâmicos, é predominantemente usado para processar pós metálicos. Este tem como princípio de funcionamento, a utilização de uma fonte de calor, geralmente um feixe laser ou um feixe de eletrões, focalizada num ponto de forma a fundir instantaneamente o material depositado. Na Figura 3 é apresentado um esquema do princípio de funcionamento deste processo [9]. A cada passagem da cabeça, é criado um rasto de material fundido e já solidificado ao longo de diferentes camadas. O processo distingue-se dos anteriores pelo facto da deposição do pó metálico ocorrer em paralelo com o processo de fundição. Esta característica requer que no fabrico de peças de geometria mais complexa e com partes suspensas seja necessário criar adicionalmente estruturas de apoio.

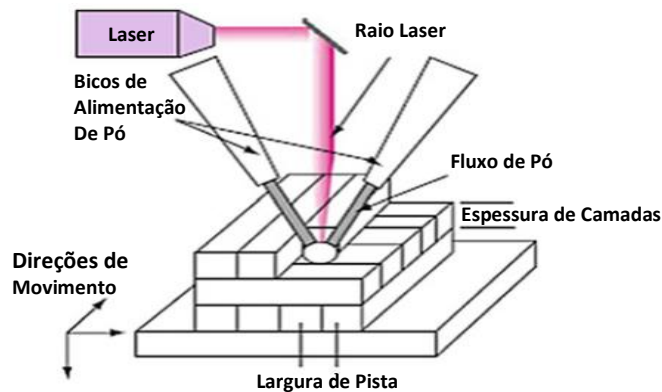


Figura 3 - Esquema típico de um processo de deposição por energia direcionada (adaptado de [9])

### 2.2.4. *Sheet Lamination* (Laminação de folhas)

Considerada como uma das primeiras técnicas de fabrico aditivo a ser comercializada em 1991 [11], o fabrico por laminação de folhas tem como princípio de funcionamento o corte laser  $CO_2$  de folhas finas, com espessuras entre os 0,07 mm e 0,2 mm, as quais são sequencialmente coladas camada-por-camada [9]. Na Figura 4 é possível observar-se um esquema exemplificativo deste processo de fabrico. O facto da construção ser realizado de modo incremental, com a colagem das lâminas, esta proporciona uma estabilidade da mesma, não requerendo a utilização de estruturas de apoio. Em comparação com os processos de fabrico anteriores, este processo possibilita o fabrico de peças extensas a custos relativamente mais reduzidos em conjunto com uma velocidade de construção comparativamente mais elevada [9].

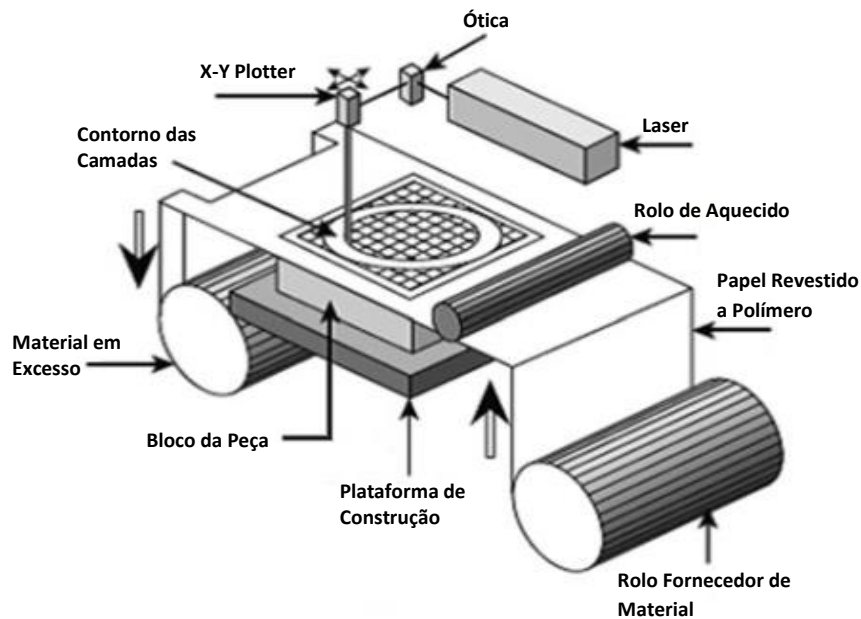


Figura 4 - Esquema representativo do processo de *sheet lamination* (adaptado de [9])

### 2.2.5. Análise Comparativa dos Vários Processos

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre os diversos processos mencionados anteriormente, foi desenvolvida uma tabela. Esta tabela destaca as várias tecnologias associadas a cada processo, além de listar as suas vantagens e desvantagens respetivamente

Tabela 1 - Processos de fabrico aditivo em metal.

Processos	Tecnologias	Vantagens	Desvantagens
<b><i>Binder Jetting</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impressão 3D</li> <li>- Impressão é jato de tinta</li> <li>- S-Print</li> <li>- M-Print</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo desperdício de material.</li> <li>- Reaproveitamento quase total do material não agregado</li> <li>- Alta precisão no fabrico de camadas, possibilidade de utilizar diferentes matérias-primas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto investimento em maquinaria</li> <li>- Peças produzidas apenas com uma cor</li> <li>- Necessário pós-processamento para finalização das peças</li> </ul>
<b><i>Direct Energy Deposition</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deposição direta de material</li> <li>- Deposição laser</li> <li>- Consolidação laser</li> <li>- Fusão direta com feixe de eletrões</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altas taxas de deposição de material, alta produtividade, sem desperdício de material</li> <li>- Possibilidade de utilizar pó ou fio numa só impressão</li> <li>- Fabrico de peças com densidades elevadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acabamentos superficiais maus, necessária maquinação após impressão</li> <li>- Problema no fabrico de certas geometrias devido à dificuldade em criar estruturas de suporte</li> </ul>

<b>Processos</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b><i>Powder Bed Fusion</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sinterização seletiva por laser (SLS)</li> <li>- Fusão seletiva por laser (SLM)</li> <li>- Fusão por feixe de elétrons (EBM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo de produção</li> <li>- Material não utilizado é facilmente reaproveitado</li> <li>- Utilizado para baixos e altos volumes de produção</li> <li>- Necessita de poucas estruturas de apoio na impressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevados tempos de fabrico</li> <li>- Alto consumo de energia</li> <li>- Qualidade de impressão dependente do tamanho do grão</li> </ul>
<b><i>Sheet Lamination</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consolidação por ultrassons</li> <li>- Manufatura de objetos laminados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo de produção</li> <li>- Sensores e fios podem ser embutidos durante a impressão</li> <li>- Possibilidade de fabrico com vários materiais em simultâneo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessário para o processamento para finalização das peças</li> <li>- Opções de material disponíveis limitados</li> <li>- Peças produzidas com alto teor de vazios</li> <li>- Desperdício de material pode ser elevado</li> </ul>

Considerando a tabela anterior, é possível concluir que todos os processos mencionados apresentam vantagens e desvantagens. No processo de *binder jetting*, há uma baixa perda de material, porém requer um investimento significativo em maquinaria. O processo de *direct energy deposition* é adequado para aplicações que exigem alta produtividade, mas resulta em peças com acabamentos de qualidade inferior e também apresenta dificuldade no fabrico de peças com geometria complexa. Por outro lado, o processo de *powder bed fusion* oferece baixos custos de produção, capacidade de lidar com altos e baixos volumes de produção, e minimiza o desperdício de material. No entanto, é uma tecnologia com baixa produtividade e alto consumo energético. Por fim, o processo de *sheet lamination* também possui custos de produção reduzidos e permite a incorporação de sensores e fios durante a impressão, mas resulta em elevados desperdícios de material e peças com elevado teor de vazios.

Com esta tabela é possível concluir que não existe um processo de fabrico “universalmente melhor”. A escolha do processo depende das necessidades específicas do projeto, do tipo de material utilizado e das dimensões das peças a serem fabricadas. Neste caso em particular, foi utilizado o processo de *powder bed fusion* com a tecnologia de fusão seletiva por laser para o fabrico de provetes. Com esta tecnologia foi possível utilizar o material desejado para o estudo como foi possível o fabrico dos provetes com várias direções de fabrico.

### 2.2.6. Tecnologia de Fusão Seletiva por Laser (SLM)

Desenvolvida em 1995 no instituto Fraunhofer por Dieter Schwarze Matthias Fockele [12], a tecnologia de SLM tinha como principal objetivo a produção de componentes a partir de pós metálicos. Como referido na Tabela 1, SLM faz parte dos processos de fusão por cama de pó. Trata-se de uma das tecnologias mais utilizadas na indústria [13], por ser mais versátil em comparação com todas as outras tecnologias. Esta permite utilizar vários tipos de materiais, desde alumínio, titânio, ferro, níquel, cobalto, cobre e seus compostos [14–20]. Existem muitas vantagens na utilização do processo SLM, no que se refere à capacidade de combinar vários materiais, criar peças amorfas devido às rápidas taxas de arrefecimento, custos de produção relativamente baixos e a produção de peças prontas para utilizar [21]. Por outro lado, este processo também possui algumas desvantagens, como tempos de produção relativamente elevados, limitação no volume das peças, elevado consumo energético, elevado investimento inicial e tempos longos no ajuste dos parâmetros de fabrico [21].

Na Figura 5 é possível observar-se os principais componentes do sistema SLM. Esta tecnologia tem como princípio de funcionamento a utilização de um feixe laser para criar a fusão de uma camada de pó previamente depositada na superfície. O fabrico das peças por este processo segue as nove etapas descritas a seguir:

1. A peça para fabrico é desenhada em *computer-aided-design* (CAD) e seguidamente convertida para um documento *standard tessellation language* (STL);
2. A peça é orientada e posicionada no programa STL de acordo com o volume de trabalho e de modo a minimizar a necessidade de criar estruturas de apoio;
3. As estruturas de apoio são geradas considerando o processo de construção da geometria;
4. Ainda no programa STL, a peça é dividida em camadas de igual espessura (secções 2D) e seguidamente enviada para a máquina de impressão;
5. De forma a dar início ao processo de impressão, a plataforma de construção é pré-aquecida para minimizar a geração de tensões residuais e de distorções geométricas, e reduzir a potência do feixe laser requerida;
6. Todo o processo de impressão é realizado num ambiente de gás inerte, normalmente nitrogénio ou argon, dependendo da reatividade do pó metálico em uso, de forma a prevenir oxidação e outros problemas que possam afetar as propriedades mecânicas do produto final [22];
7. Uma camada de pó metálico de acordo com a espessura pré-definida é depositada na plataforma de construção;
8. Um raio laser é utilizado para fundir áreas específicas do material depositado, promovendo ligação das partículas da camada à superfície da peça já fabricada;
9. Após a fusão das partículas, a plataforma de construção é rebaixada e uma nova camada de pó é depositada.

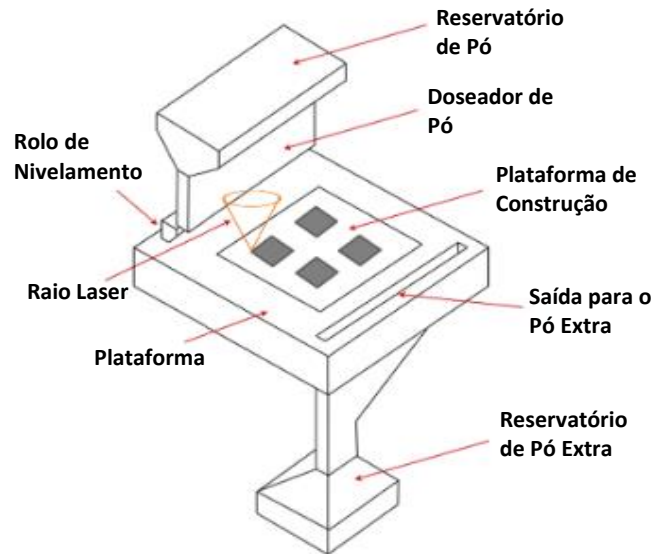


Figura 5 - Esquema representativo do processo de fusão seletiva por laser (adaptado de [23])

Repetindo as etapas de 7 a 9, a peça vai sendo fabricada camada-por-camada até estar completa. Contudo, para minimizar a ocorrência de defeitos durante o fabrico da peça, devem ser ajustados uma série de parâmetros, tais como: a potência do laser, a largura da poça de material fundido, a velocidade de varrimento e a espessura de camada [24].

O ajuste da potência do laser permite controlar o nível de energia transmitida e o volume de metal fundido. Para materiais metálicos altamente refletivos, tal como o alumínio, é necessário aplicar níveis de energia mais elevados, caso contrário, ocorrerá fusão parcial do pó metálico e a peça apresentará vazios [25]. O volume de metal fundido deverá permitir a sua ligação tanto à superfície superior da peça já fabricada, como a ligação entre o material de uma mesma camada, durante as diferentes passagens do feixe laser [26]. Os parâmetros a definir no processo de fabrico da peça são a largura entre passagens do feixe, a velocidade de varrimento, a potência do feixe laser, a espessura da camada de pó metálico e o tempo de fabrico da peça [24]. O volume de material fundido condiciona a distância entre passagens do feixe laser e a espessura de camada de material adicionado. Volumes pequenos resultam no aumento do número de passagens e na redução da espessura de material adicionado, traduzindo-se num maior tempo de fabrico. Refira-se que o excesso de espessura do material depositado conduz à falha da sua ligação à peça e ao aparecimento de vazios, o que poderá colocar em causa a sua integridade estrutural [27]. Por outro lado, velocidades mais lentas de varrimento resultam num tempo mais longo de arrefecimento do material, proporcionando um decréscimo nas tensões residuais instaladas e uma redução das distorções geométricas na peça.

Conforme já referido, os ensaios dos provetes serão realizados na barra de Hopkinson, pelo que é importante conhecer as suas principais características, o seu princípio de funcionamento e de operação, os quais serão descritos na subsecção seguinte.

## 2.3. Introdução à Barra de Hopkinson

A barra de Hopkinson (SHPB) é o nome adotado a partir da designação Anglo-Saxónica de “*The split Hopkinson pressure bar*”, sendo esta também conhecida por barra de Kolsky [28]. A barra permite realizar ensaios a médias e elevadas taxas de deformação entre  $10^2 s^{-1}$  e  $10^3 s^{-1}$ , através da propagação de ondas num meio elástico [1]. Esta técnica é preferencialmente usada na determinação das propriedades dinâmicas dos materiais, devido à simplicidade do ensaio e à diversidade de tipos de materiais a ensaiar, tais como: metais, compósitos, polímeros, espumas, materiais celulares, betão, cerâmica, rochas, etc [28].

### 2.3.1. Evolução Histórica da Barra de Hopkinson

O dispositivo que atualmente conhecemos por barra de Hopkinson é o resultado de sucessivas melhorias introduzidas ao longo de várias décadas por vários cientistas, cujos nomes ficaram marcados na história. A sua primeira versão desenvolvida por Sir Bertram Hopkinson em 1914 [29], surgiu no seguimento dos trabalhos iniciados por seu pai, Sir John Hopkinson, o qual demonstrava experimentalmente que os metais resistiam a valores de carga maiores se as solicitações fossem sob a forma de um impulso [1]. Pelo facto de Sir Bertram Hopkinson ter sido pioneiro no estudo de propagação de ondas em barras, estes dispositivos são atualmente denominados pelo seu nome “barra de Hopkinson”. Mais tarde em 1948, foi publicado um extenso trabalho realizado por Davies, o qual propõe um aperfeiçoamento do dispositivo através da medição das ondas por meio de microfones capacitivos [30]. Em 1949 é publicado o trabalho de Kolsky, que utiliza uma configuração semelhante à de Davies, mas com duas barras em vez de uma e coloca uma amostra entre as duas barras para caracterizar as propriedades compressivas do material [31]. Em 1954 Krafft, Sullivan e Tipper substituíram os microfones capacitivos, da versão anterior, por extensómetros, com o objetivo de registarem a propagação das diferentes ondas ao longo das barras [32]. Outras contribuições importantes para a evolução da barra foram realizadas por Chiddister e Malvern em 1963 [33]. Estes realizaram testes de compressão a temperaturas elevadas de forma a calcular o efeito do gradiente térmico nas barras. Harding, Wood e Campbell em 1960 [34] e Lindholm e Yeakley em 1968 [35], realizaram ensaios dinâmicos uniaxiais em amostras roscadas e na forma de chapéu, respetivamente. Outra abordagem inovadora veio da parte de Nicholas em 1980 [36], o qual colocava uns batentes do mesmo material das barras em volta da amostra de forma a transmitir a onda incidente e apenas aplicar à amostra a solicitação da onda refletida da extremidade livre da barra. A configuração da barra de Hopkinson para forças de torção foi realizada por Baker em 1966 [37], na qual estudou a resistência ao corte de uma barra de cobre pré-torcida. Hartley, Duffy e Hawley apresentaram em 1985 uma revisão dos trabalhos realizados sobre ensaios à torção na barra de Hopkinson [38]. Propriedades de corte [2, 39–43] e tensão de corte em lubrificantes [44], também foram estudadas. Revisões abrangentes sobre o método clássico da barra de Hopkinson e outras conquistas até ao século 21, podem ser consultadas nas seguintes referências [45–48].

### 2.3.2. Barra de Hopkinson para ensaios à compressão

Um modelo de barra de Hopkinson, habitualmente usada na realização de ensaios de compressão é apresentado na Figura 6. Esta é constituída por 3 barras cilíndricas esbeltas, uma barra de impacto, uma barra de entrada e uma barra de saída, um canhão pneumático e um sistema de aquisição de dados, para o registo das ondas elásticas de tração/compressão geradas pelo impactor [1]. O provete do material a ensaiar é colocado entre a barra de entrada e barra de saída. A onda de compressão é criada pela barra de impacto através da sua projecção contra a barra de entrada. O canhão pneumático, formado por um reservatório de pressão e uma electroválvula de disparo rápido, é usado para impulsionar a barra de impacto. A velocidade de projecção desta barra é controlada através do ajuste da pressão no reservatório, sendo a velocidade de impacto medida imediatamente antes do seu contacto com a barra de entrada, através de dois sensores fotoelétricos montados próximos da barra de entrada. O impacto gera uma onda elástica de deformação de compressão, denominada de onda incidente  $\varepsilon_I(t)$ , a qual se propaga ao longo da barra de entrada até chegar ao provete. Neste, a deformação da onda elástica incidente de compressão divide-se em onda refletida de tração  $\varepsilon_R(t)$  e onda transmitida de compressão  $\varepsilon_T(t)$ , sendo que esta última se propaga ao longo da barra de saída. As deformações das ondas incidente de compressão e refletida de tração ( $\varepsilon_I(t)$  e  $\varepsilon_R(t)$ ) são medidas através de extensómetros montados na barra de entrada e a deformação da onda transmitida de compressão  $\varepsilon_T(t)$  é medida por extensómetros montados na barra de saída. Esta informação é combinada para obter-se a curva tensão-deformação do material ensaiado. Cuidados devem ser tomados para que a deformação gerada pelo impacto seja suficiente para provocar a rutura do provete, mas sem exceder a tensão limite elástica do material usado para as barras [1].

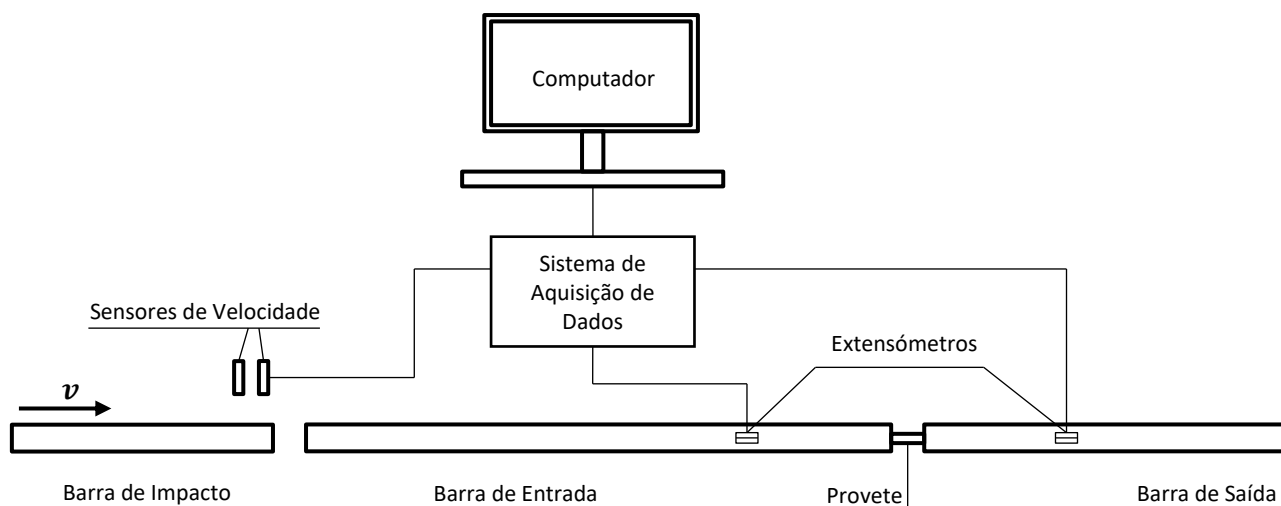


Figura 6 - Barra de Hopkinson para realização de ensaios à compressão (adaptado de [1])

A técnica possibilita a determinação indireta da curva tensão-deformação do material, sem a necessidade de utilizar uma célula de carga ou transdutor de deslocamento. Por outro lado, é necessário o pós-processamento das deformações produzidas pela propagação das ondas ao longo das barras. Este dispositivo continua ainda hoje a ser usado por ser de construção simples e permitir realizar medições precisas.

A quantidade de energia, a impedância mecânica, as dimensões e geometria dos provetes, a taxa de deformação e a dureza do material são as principais características que condicionam a forma como este dispositivo é projetado. A quantidade de energia envolvida num ensaio é determinada pela velocidade e a massa da barra de impacto. Quando esta é disparada e embate com a barra de entrada, gera-se uma onda de deformação chamada, impulso incidente, cuja largura da onda é definida pelo comprimento da barra de impacto, sendo a amplitude da deformação definida por [1],

$$\varepsilon_I(t) = \frac{v}{-c_0} \quad (2.1)$$

em que  $v$  é a velocidade da barra de impacto e  $c_0$  a velocidade de propagação das ondas no meio contínuo [1].

A partir da pré-seleção do diâmetro e material das barras, são definidos o comprimento da barra de impacto e a sua velocidade máxima, de modo que a tensão gerada pelo impacto não exceda o limite elástico das barras. Para prevenir os efeitos de bordo e gerar ondas unicamente na direção axial das barras cilíndricas, é necessário garantir que o seu comprimento seja no mínimo 10 vezes superior ao seu diâmetro. Relativamente ao diâmetro dos provetes, estes não podem ser inferiores ao diâmetro das barras, pois provocam aparecimento de ondas de frente esférica ou ondas dilatacionais [28].

Para minimizar os efeitos da dispersão da propagação da onda e limitar o comprimento das barras, os extensómetros deveriam ser montados junto ao provete. Contudo, esta pretensão não pode ser cumprida devido às perturbações geradas na interface barra-provete e à necessidade de realizar leituras independentes das deformações produzida pela onda incidente, refletida e transmitida. Refira-se que a largura da onda gerada é função do comprimento da barra de impacto. Assim, para evitar a sobreposição da leitura das deformações da onda incidente e da onda refletida, o comprimento da barra de entrada deve ter no mínimo 2,5 vezes o comprimento da barra de impacto e o extensómetro deverá estar situado a meio [1]. Quanto à barra de saída, a distância do extensómetro ao provete de ser no mínimo 15 vezes o diâmetro desta barra, para evitar as perturbações geradas na interface provete-barra, e a distância do extensómetro à extremidade livre deve ser pelo menos 1,25 vezes o comprimento da barra de impacto, para evitar a sobreposição da onda transmitida com a sua reflexão na extremidade desta barra [28].

O registo temporal das deformações das ondas incidente  $\varepsilon_I(t)$ , refletida  $\varepsilon_R(t)$  e transmitida  $\varepsilon_T(t)$ , podem ser observadas no diagrama de Lagrange apresentado na Figura 7. Neste diagrama, o eixo das abcissas representa as distâncias ao longo do dispositivo e o eixo das ordenadas a evolução temporal. As linhas na diagonal representam a propagação da frente da onda ao longo do tempo. É possível observar-se que quando são cumpridas todas as relações anteriormente descritas, o registo das três ondas ocorre sem que se verifique sobreposição.

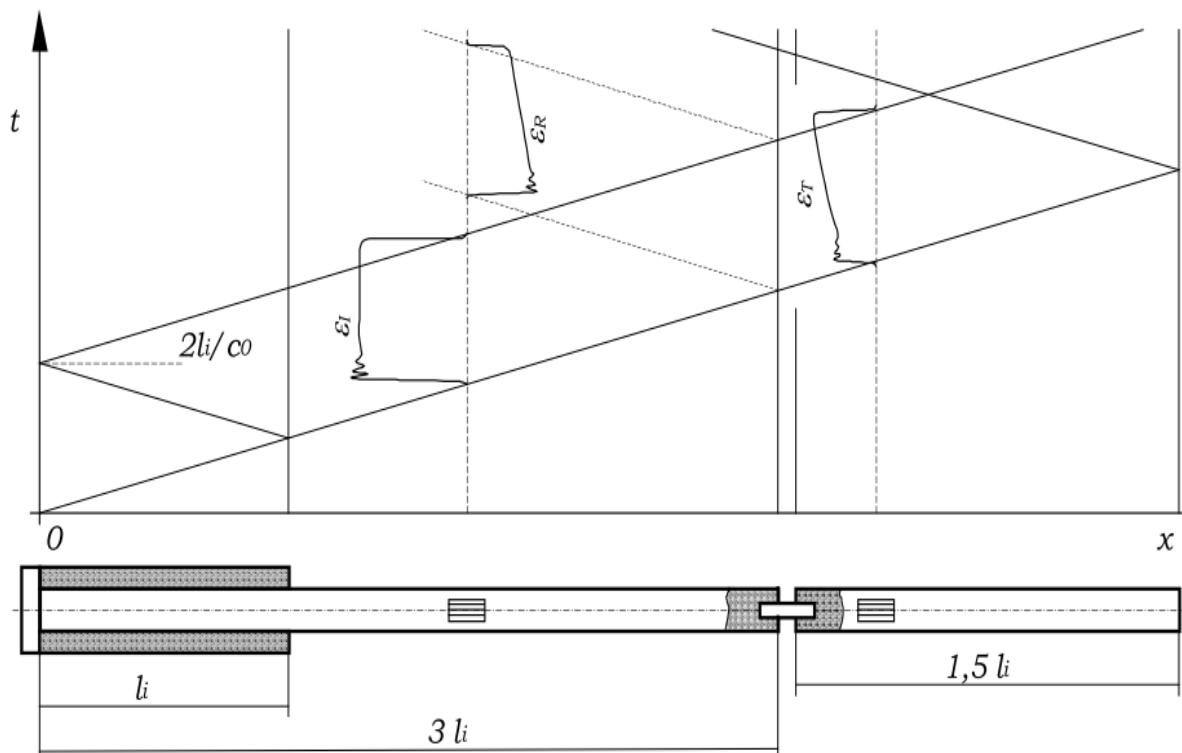


Figura 7 - Diagrama de Lagrange referente ao registo temporal das deformações geradas pelas ondas incidente, refletida e transmitida na barra de Hopkinson à compressão [1]

### 2.3.3. Barra de Hopkinson para ensaios à tração

Apesar da barra de Hopkinson ter sido inventada com o intuito de realizar ensaios de compressão, esta também pode ser adaptada para ensaios de tração. Desde 1960 vários autores apresentaram diferentes dispositivos, em que se destaca o primeiro dispositivo proposto por Harding [28] capaz de realizar um ensaio de tração [49].

As duas maiores dificuldades que este tipo de configuração apresentam são: como gerar uma onda de tração e como conceber amarras para fixar o provete sem introduzir variação na impedância mecânica entre as barras e o provete. A geração de uma onda de tração pode ser realizada através de uma barra de impacto tubular, conforme se mostra na Figura 8, ou pela reflexão de um impulso compressivo na extremidade livre da barra de saída, mostrado na Figura 10 [36].

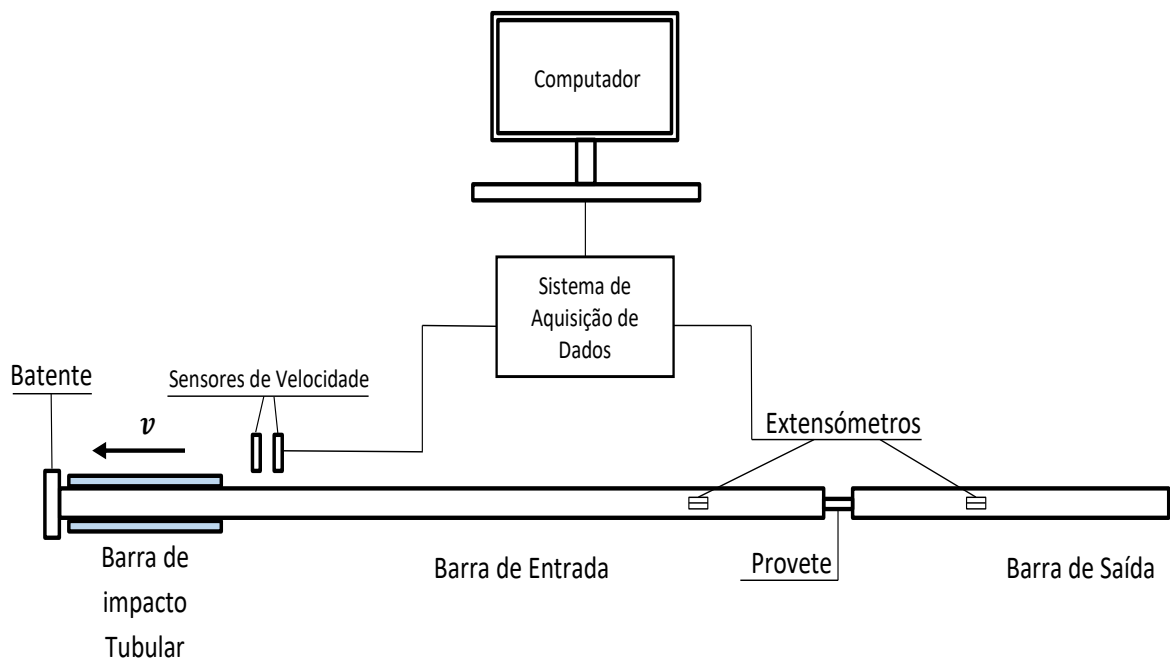


Figura 8 - Barra de Hopkinson para realização de ensaios à tração (adaptado de [1])

Para a barra de impacto tubular é necessária especial atenção, pois deverá possuir uma impedância idêntica à das barras de entrada e saída, e um batente para receber o impacto. Esta poderá também ser considerada uma das principais limitações desta configuração, uma vez que tanto o impactor como o batente são difíceis de projetar e fabricar. Por outro lado, a geometria do batente deverá ser selecionada para, simultaneamente, resistir ao embate da barra de impacto e gerar uma forma adequada da onda incidente de tração. As dimensões das barras e a posição dos extensômetros seguem as mesmas condicionantes enunciadas para a barra de Hopkinson para ensaios à compressão, isto é, a posição dos extensômetros e as dimensões das barras devem permitir a medição das deformações das ondas incidente, refletida e transmitida sem que haja sobreposição e se manifeste o efeito das perturbações provocadas pela interface barras-provete. A Figura 9 apresenta a barra de Hopkinson para ensaios à tração e o diagrama de Lagrange, onde também é possível observar as relações de comprimento entre as barras de entrada, saída e de impacto tubular.

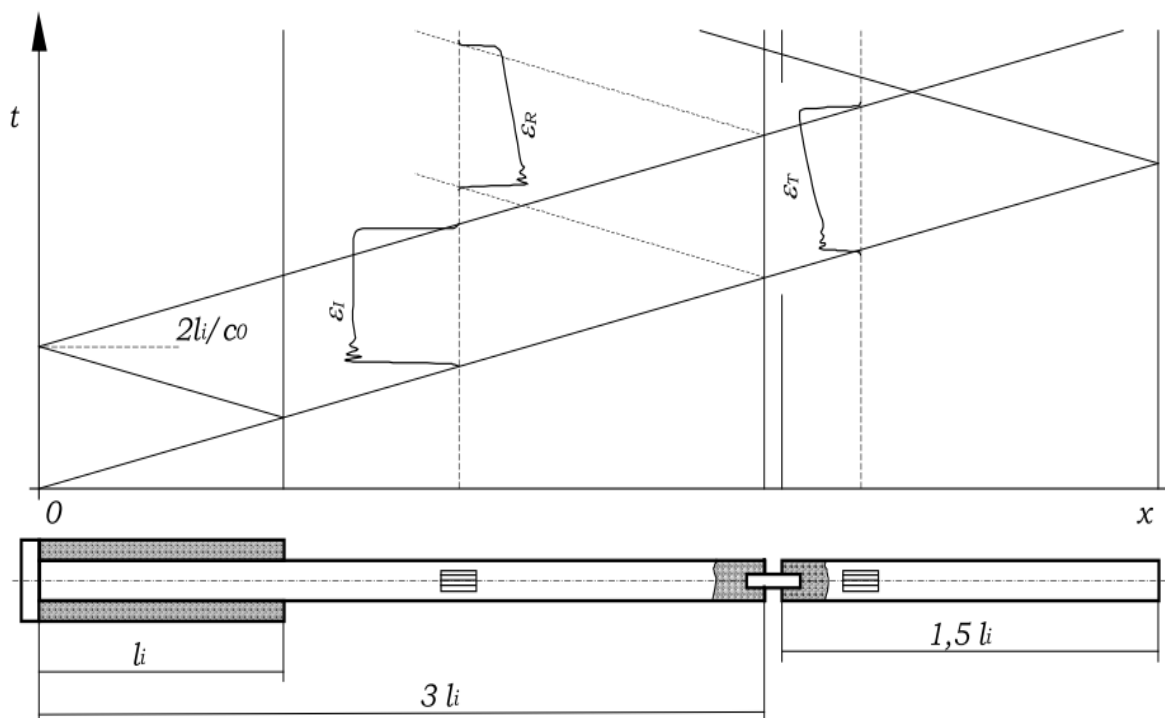


Figura 9 - Diagrama de Lagrange sobre o registro temporal das deformações geradas pelas ondas incidente, refletida e transmitida na barra de Hopkinson à tração, por embate de uma barra de impacto tubular [1]

A leitura deste diagrama de Lagrange é em tudo semelhante ao do ensaio de compressão. Pelo contrário, a deformação gerada pela onda incidente e transmitida é de tração e a refletida é de compressão.

No dispositivo em que a onda de tração é gerada por reflexão do impulso compressivo, a barra de impacto embate sobre a barra de saída, conforme se representa na Figura 10. Para que a onda de compressão percorra todo o dispositivo sem solicitar o provete, é colocado um casquilho cilíndrico do mesmo material e diâmetro exterior ao das barras. Quando este impulso chega ao extremo livre da barra de entrada, ocorre uma reflexão e então gera-se uma onda incidente de tração no sentido oposto. A sua passagem pelo provete provoca um carregamento dinâmico em tração sem interferência do casquilho. Este modelo de dispositivo permite gerar ondas de comprimento superior ao modelo de dispositivo com barra de impacto de tubular, para o mesmo comprimento total das barras. Na Figura 10 representa-se também o diagrama de Lagrange só relativo à onda de tração.

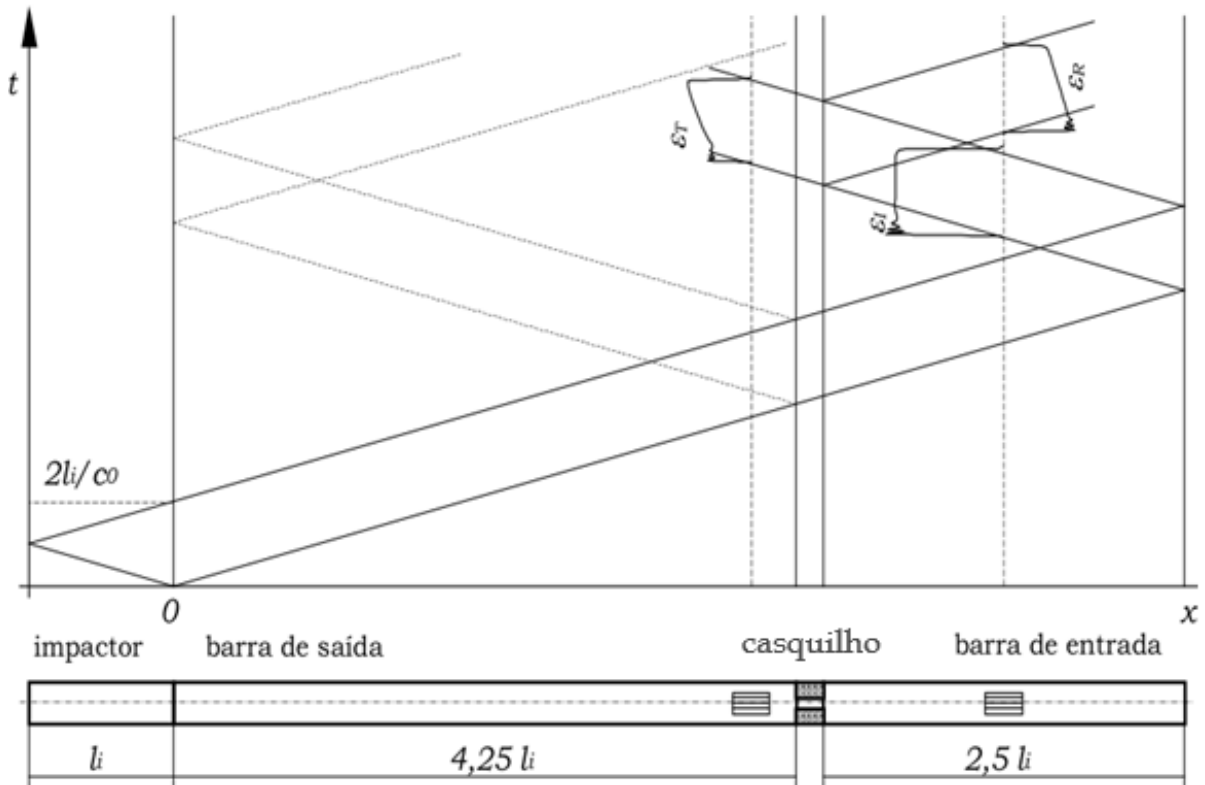


Figura 10 - Diagrama de Lagrange sobre o registo temporal das deformações geradas pelas ondas incidente, refletida e transmitida na barra de Hopkinson à tração, provete com casquilho e reflexão do impulso incidente no extremo livre [1]

Embora esta solução seja interessante pelo facto de se aproveitar a mesma barra de impacto e o canhão de um dispositivo destinado ao ensaio à compressão, existem limitações no que refere à dimensão dos provetes e do casquilho. Conforme referido, a onda de tração resulta da reflexão da compressão na extremidade livre da barra de entrada, a qual deverá possuir um comprimento suficiente para que não ocorra sobreposição entre a onda gerada de compressão e a onda refletida de tração. Para garantir que não ocorrem reflexões significativas na passagem da onda de compressão pelo casquilho e provete, estes deverão ser dimensionados para garantir que possuem impedâncias mecânicas semelhantes aos das barras.

### 2.3.4. Propagação de Ondas Elásticas em Barras Cilíndricas

Para a obtenção de resultados precisos é de grande importância entender o princípio de propagação de ondas em meios contínuos. Existem vários tipos de ondas elásticas, sendo as mais comuns as ondas longitudinais, de corte ou transversais, de Rayleigh ou superficiais, de flexão, de Stoneley ou interfaciais [1, 50]. De forma a caracterizar a resposta dinâmica dos materiais, são as utilizadas na barra da Hopkinson as ondas longitudinais, as ondas de corte ou transversal:

- Nas ondas longitudinais, o movimento das partículas ocorre paralelamente à direção da propagação da onda, gerada por o impacto axial;
- Nas ondas de corte ou transversais, o movimento das partículas é perpendicular à direção da propagação da onda. A versão da barra de Hopkinson para torção é um bom exemplo, pois aplicando um binário e utilizando uma pinça hidráulica a energia torsional é armazenada e, uma vez libertada a onda elástica, propaga-se ao longo da secção transversal da barra incidente [28].

Para deduzir a lei que descreve a propagação das longitudinais, apresenta-se na Figura 11 um modelo de barra sujeita a uma onda de compressão gerada pelo impacto de uma outra barra, barra de impacto, a deslocar-se com uma velocidade  $v$ , Figura 11 (a). A onda de compressão gerada na barra apresenta numa dada secção AA'BB', de largura infinitesimal  $\delta x$ , um deslocamento na direção axial descrito pela quantidade  $u(t)$ , Figura 11 (b). Na Figura 11 (c) são apresentadas as forças que atuam neste elemento infinitesimal de largura  $\delta x$  [50].

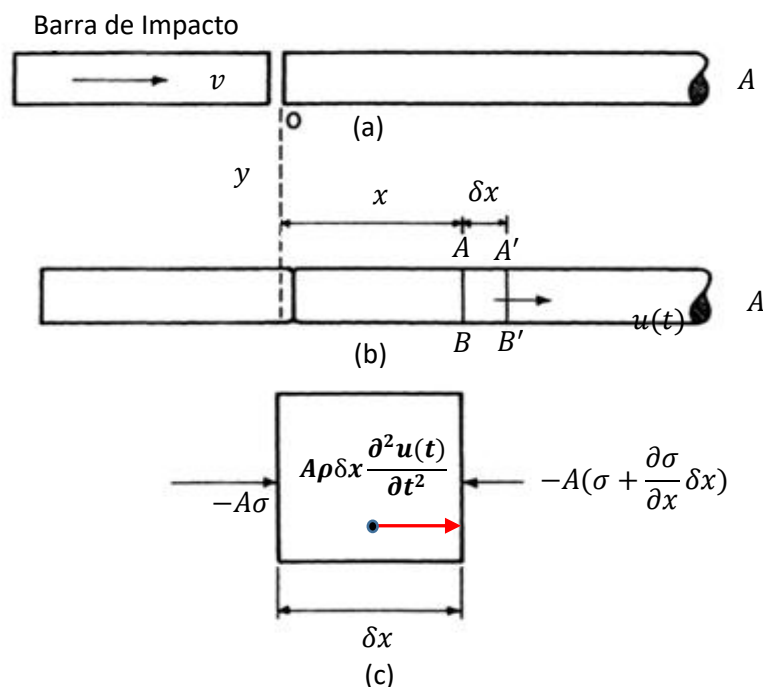


Figura 11 - Análise das forças geradas num elemento infinitesimal de barra devido à propagação de ondas axiais de compressão, (a) antes do impacto, (b) depois do impacto e (c) forças a atuar no elemento infinitesimal, (adaptado de [28])

Por aplicação da segunda lei de Newton ao elemento infinitesimal é deduzida a seguinte equação diferencial [50],

$$-A\sigma + A \left[ \sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \right] = A\rho \delta x \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

onde  $\rho$  representa a massa volúmica,  $\sigma$  as tensões geradas pela propagação da onda de compressão,  $A$  a área da secção e  $u(t)$  o deslocamento na direção longitudinal da barra. Assumindo que a deformação ocorre no regime elástico e introduzindo a lei de Hook generalizada ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ), é deduzida a equação da velocidade de propagação de uma onda longitudinal numa barra cilíndrica, a qual é dada por [50].

$$c_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

Apenas a propagação de ondas longitudinais em meios finitos, como é o caso da barra de Hopkinson é descrita na equação (2.3). Contudo, um impacto externo num meio contínuo além de ondas longitudinais, observam-se ondas de corte e de Rayleigh [50]. A expressão que permite considerar os diferentes tipos de onda a uma dimensão e num meio contínuo é definida por [28].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_o^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

### 2.3.5. Impedância Mecânica

Energia de deformação elástica e a energia cinética propagam-se numa barra na forma de ondas elásticas, através do movimento das partículas [1]. A reflexão ou refração do movimento destas partículas ocorre quando são encontradas descontinuidades geométricas ou variações das propriedades elásticas dos materiais. Esta resistência ao movimento das partículas é descrita pela impedância mecânica e definida pela quantidade  $Z$ , a qual é função da massa volúmica  $\rho$ , da área da secção  $A$  e da velocidade da propagação da onda elástica ( $c_o$ ) [1],

$$Z = A\rho c_o = \frac{AE}{c_o} \quad (2.5)$$

Esta equação descreve a resposta da onda a qualquer variação da impedância mecânica, através da definição do nível reflexão e transmissão em cada descontinuidade. No caso da barra de Hopkinson, esta variação na impedância mecânica pode ocorrer por alteração da secção cilíndrica devido à configuração geométrica do provete ou pelas diferenças nas propriedades elásticas entre o provete e as barras.

Para medir a amplitude das ondas refletidas e transmitidas na presença de descontinuidades, é necessário estabelecer a relação entre a tensão e a propagação da onda na direção uniaxial. Assim, por aplicação do método de D' Alembert, é deduzida a equação da propagação da onda uniaxial [1],

$$u(x, t) = f(x - C_0 t) + g(x + C_0 t) \quad (2.6)$$

onde  $f$  e  $g$  são funções arbitrárias que descrevem a forma de propagação de uma onda longitudinal na direção  $x$  e para uma velocidade  $C_0$ . Assumindo que a propagação da onda só ocorre no sentido positivo de  $x$ , é estabelecida a relação entre as tensões  $\sigma$  e a velocidade de propagação da onda uniaxial  $v_p$  [28],

$$\sigma = -\rho C_0 v_p \quad (2.7)$$

a qual permite determinar o valor de tensão induzido num sistema homogéneo em função da velocidade das partículas ( $v_p$ ) e das propriedades do material ( $\rho$ ) e da velocidade de propagação das ondas ( $C_0$ ).

## 2.4. Técnica de correlação Digital de Imagem

A correlação digital de imagem (DIC), é uma técnica que permite realizar sem contacto e com elevada resolução medições do campo de deslocamentos e de deformações na superfície das estruturas [51, 52]. Esta técnica tem como princípio de funcionamento o seguimento de padrões de *speckle* previamente gravados na superfície do corpo. Estes padrões são registados na forma de imagem por uma câmara durante e/ou após uma solicitação [53]. A partir da correlação destes padrões entre diferentes imagens são determinados os campos de deslocamentos e deformações.

Gilbert Hobrough é considerado um dos pioneiros na aplicação da técnica de correlação de imagem, tendo apresentado os primeiros trabalhos na década de 1950. No entanto, só em 1961 apresentou o primeiro equipamento dedicado à medição por correlação de imagem [54, 55]. Na mecânica, a técnica foi inicialmente utilizada para caracterizar o comportamento de corpos a partir de registos holográficos e registos de padrões e de Moiré. No entanto, o registo em filme fotográfico apresentava diversas dificuldades ao pós-processamento da informação, as quais foram ultrapassadas com a introdução das câmaras digitais na década de 1970 [51]. Com o registo digital das imagens começaram a surgir novas ferramentas para a correlação das imagens [51, 56].

Walter H. Peters e Walter F. Ranson em 1982 foram dos primeiros a propor a determinação dos deslocamentos a partir da comparação entre sub-regiões de igual dimensão entre imagens, adquiridas antes e após a deformação [57]. Sutton em 1983 apresentou medições a partir de imagens digitais, designando a técnica por correlação digital de imagem, nome pela qual esta técnica é atualmente conhecida [58]. Moriomoto e Fujigaki na década de 1990 estenderam o domínio de aplicação da técnica a medição do campo de deslocamentos no espaço, medição tridimensional (3D), recorrendo ao uso duas câmaras [59]. Yuh J. Chao desenvolveu mais tarde um sistema de aquisição em *stereo*, para medir a propagação tridimensional de fendas [60]. Na atualidade, a técnica de DIC tem despertado um grande interesse da comunidade científica e do setor industrial devido, principalmente, à sua flexibilidade e baixo custo. Na Tabela 2 são resumidas as principais vantagens e desvantagens da técnica DIC relativamente às outras técnicas experimentais.

Tabela 2- Vantagens e desvantagens da técnica de DIC.

Vantagens	Desvantagens
Simplicidade do processo	Necessita de se criar um padrão <i>speckle</i>
Processo eficaz e eficiente	Requer calibração
Técnica de medição de campo	Elevada sensibilidade e desalinhamento
Permite medições sem contacto	Requer bastante iluminação
Grande variedade de aplicações	Limite máximo de 0,01 da dimensão do pixel
Baixo custo de implementação	Requer estabilidade da montagem

A técnica de DIC pode subdividir-se 3 categorias, definidas de acordo com o tipo de análise ou medição a realizar: medição no plano (DIC-2D), medição no espaço (DIC-3D) e medição em volumes (VIC), as quais são em seguida descritas:

- A **correlação digital de imagem para medições no plano (DIC-2D)**, utiliza apenas uma câmara para aquisição de imagens, pelo que só permite realizar medições dos campos de deslocamento e deformações em superfícies com pequena curvatura, pois deformações fora do plano conduzem erros significativos na medição [53].

- A **correlação digital da imagem no espaço (DIC-3D)**, utiliza duas câmaras sincronizadas ou apenas uma câmara com um sistema de divisão de luz [61], o qual permite com elevada precisão a medição dos campos de deslocamentos e deformações a três dimensões, tanto em superfícies planas como em superfícies com curvatura elevada [53].

- A **correlação digital de imagem volumétrica (VDIC)**, apresenta-se como evolução da técnica de DIC-3D, a qual permite efetuar medições do campo de deslocamentos ou de deformações no interior de corpos opacos, sendo as imagens habitualmente obtidas por tomografia axial computadorizada[51], [53]

### 2.4.1. Procedimento de medição

Conforme mencionado, a técnica de DIC permite realizar medições sem contacto e com uma elevada resolução espacial do campo de deslocamentos e deformações. O seu domínio de aplicação é vasto, desde que o nível de deslocamentos e deformações se enquadre com a sensibilidade da técnica. Esta é usada para a análise da propagação de fendas, no realizar de ensaios a altas temperaturas, fadiga, vibrações e na identificação de danos em materiais compósitos [51]. É uma técnica utilizada na caracterização das propriedades de grande gama de materiais. Na Figura 12 apresenta-se um sistema de DIC-2D, semelhante ao que será usado para a medição do campo de deslocamentos e deformações na superfície do provete durante os ensaios a médias e elevadas taxas de deformação. Este é constituído por uma câmara e respetiva lente, um sistema de iluminação uniforme, um dispositivo para o carregamento do provete e um computador para o controlo e registo das imagens.

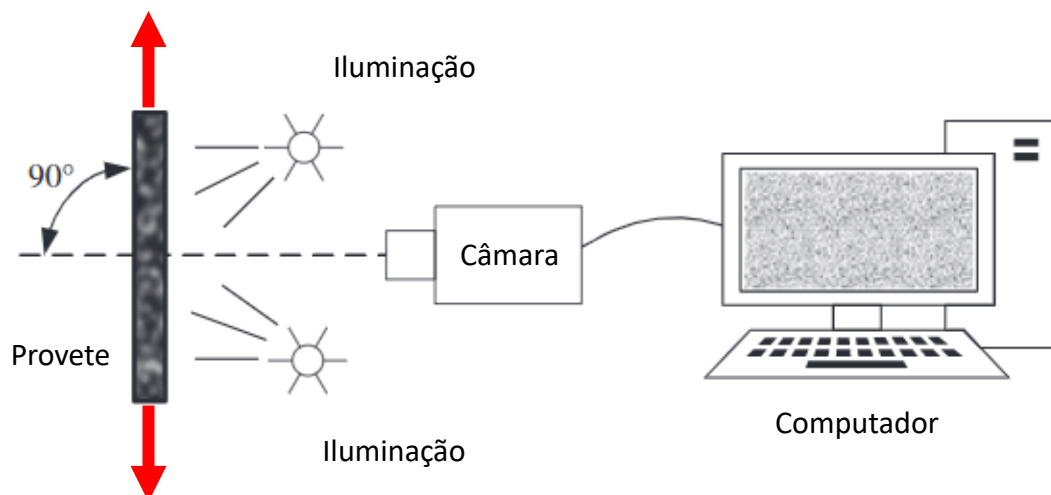


Figura 12 - Representação esquemática de um sistema de DIC-2D (adaptado de [62])

Para que esta técnica seja eficaz é necessário dar cumprimento às seguintes etapas:

- **Criação de padrões de *speckle*** - É necessário a criação de padrões de *speckle* com distribuição aleatória e dimensão adequada do grão na superfície de medição, quando a textura natural da superfície não apresenta um padrão e um contraste adequados para realizar as medições.
- **Aquisição de imagem** - Através de uma ou mais câmaras é realizado o registo em imagem dos diferentes padrões de *speckle* durante a deformação do corpo, as quais são armazenadas num computador para posterior análise. A precisão da medição está fortemente relacionada com a qualidade da imagem adquirida pelas câmaras. Câmaras com sensores de elevada sensibilidade e baixo ruído, lentes com baixas distorções e elevada resolução ótica e o uso de uma iluminação adequada, são fatores que contribuem para a melhoria da qualidade da imagem e, conseqüentemente, para uma maior precisão da medição. É igualmente importante a estabilidade da montagem durante os ensaios para minimizar a influência das perturbações externas nas medições.
- **Determinação dos campos de deslocamentos e deformações** – Os campos de deslocamentos e deformações são determinados através de algoritmos que correlacionam os padrões de *speckle* entre imagens registadas nos vários estágios de deformação do corpo [51]. Programas dedicados ao processamento de imagens de *speckle* permitem definir a dimensão e a distribuição espacial das sub-regiões de análise, a acelerar o tempo de cálculo e analisar os campos obtidos.

### 2.4.2. Criação do padrão de *speckle*.

O padrão de *speckle* a ser gravado na superfície do corpo deve possuir as características necessárias para permitir uma correta medição do campo de deslocamentos e deformações. O tamanho, a geometria, a distribuição espacial e o grau de adesão dos grãos, assim como, a estabilidade, o contraste e a área coberta do padrão de *speckle*, devem ser adaptados a cada tipo de estudo [62]. Na Figura 13 são apresentados alguns exemplos de padrões de *speckle* com características adequadas e inadequadas à medição com a técnica de DIC. Os primeiros destacam-se relativamente aos segundos, pelo elevado contraste, área de cobertura do padrão e pela dimensão e aleatoriedade dos grãos de *speckle*.

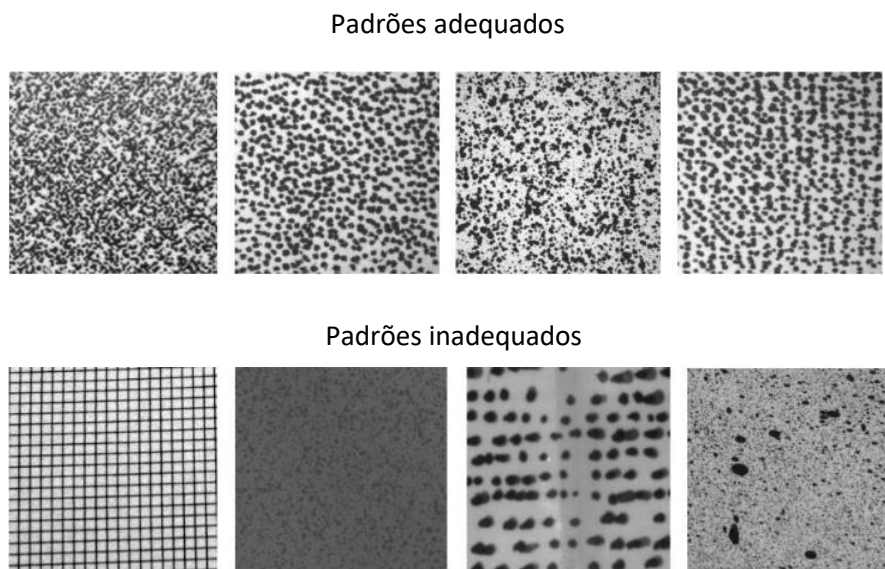


Figura 13 - Exemplos de padrões de *speckle* adequados e inadequados (adaptado de [62])

É de grande importância a correta escolha do tamanho dos grãos para que este possa ser resolvido pelo sistema de formação de imagem e registado pelo sensor da câmara. Grãos de *speckle* de maiores dimensões facilitam o processo de fabrico e aplicação, mas reduzem a resolução espacial da medição. Grãos de *speckle* de pequena dimensão tendem a gerar maior ruído na medição e favorecem os fenómenos de *aliasing* [63–65].

Os grãos de *speckle* devem apresentar uma distribuição espacial aleatória, para garantir que cada sub-região da imagem possui características distintas das regiões vizinhas e, assim, permitir seguir a sua evolução entre diferentes registos. A dimensão e geometria dos grãos deve ser uniforme para que a medição apresente igual sensibilidade [53, 66] e precisão em todas as direções [56, 67].

### 2.4.3. Sistema de aquisição de imagem

As imagens obtidas por uma ou mais câmaras devem apresentar um elevado nível de contraste, uma resolução adequada e uma elevada razão sinal ruído, para que se possam realizar medições com elevada precisão e resolução espacial [53, 67, 68]. Alguns cuidados devem ser tomados durante o processo de aquisição das imagens, tais como: a correção das distorções geométricas introduzidas pela lente, a correta focagem do padrão, a utilização de iluminação abundante e uniforme, o tempo de captura das imagens deve ser substancialmente inferior à velocidade de deformação do corpo e o padrão de *speckle* apresentar uma elasticidade e uma adesão à superfície adequadas, para transmitir a deformação do corpo [53]. No que se refere a ensaios a elevadas taxas de deformação, devem ser usadas câmaras de alta-velocidade para o registo de várias imagens durante o ensaio. Na Figura 14 é apresentada a montagem experimental usada na medição dos campos de deslocamentos e deformações produzidos durante o ensaio de tração na barra de Hopkinson [65].



Figura 14 - Montagem experimental para a medição dos campos de deslocamento e deformações gerado numa barra de Hopkinson (adaptado de [28])

A câmara de alta-velocidade utilizada nestes ensaios é da Photron®, modelo FastCam Nova-S, sendo as imagens do padrão de *speckle* adquiridas à taxa de 90 000 imagens por segundo e com uma resolução de 512x128 pixels. Esta combinação resultou do equilíbrio entre número de imagens capturadas no ensaio e a sua resolução. O tempo de exposição de cada imagem foi reduzida ao mínimo de 200 ns, para assegurar a estabilidade das imagens e o seu elevado contraste. Este foi conseguido através do uso de uma lente com uma grande abertura numérica e com o recurso a uma iluminação abundante. O campo de visão da câmara foi estendido para além da dimensão do provete, uma vez que este apresenta movimento de corpo rígido durante o ensaio [69].

#### 2.4.4. Determinação dos campos de deslocamentos e deformações

Os campos de deslocamentos e deformações produzidos pelo carregamento do corpo são determinados através do seguimento do movimento dos pixels ao longo de uma sequência de imagens, sendo que a primeira imagem é tomada como a posição de referência e corresponde, normalmente, à condição de ausência de carregamento. Contudo, a informação associada a cada pixel não é suficiente para que o processo de correlação seja realizado adequadamente, uma vez que na imagem existem centenas de pixels com o mesmo nível de intensidade [51]. O problema é solucionado através do seguimento de um conjunto de pixels  $[m \times n]$  que engloba uma pequena região da imagem. Esta é normalmente denominada por sub-região ou *subset*, a qual apresenta um padrão distinto das regiões vizinhas graças à aleatoriedade da intensidade dos grãos de *speckle* [51]. Este seguimento é realizado por correlação entre *subsets* na sequência de várias imagens, em que se procura a maior similaridade na distribuição de intensidades, ver Figura 15.

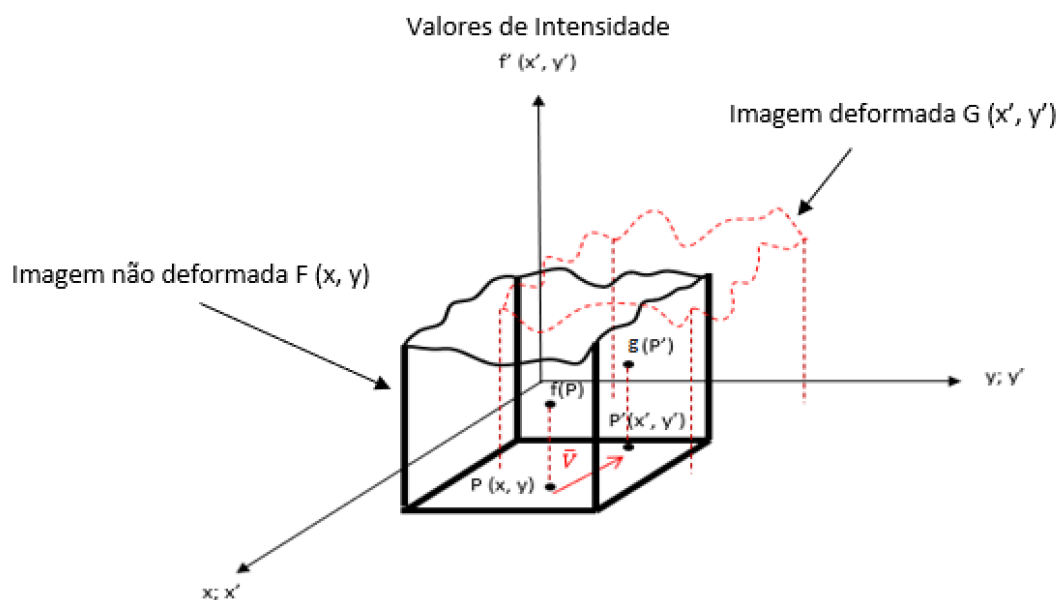


Figura 15 - Representação da evolução das deformações no *subset* (adaptado de [73])

Contudo, a distribuição de intensidades dentro de cada *subset* na forma inicialmente de quadrada ou retangular, sofre alterações com a deformação do corpo. Na procura de obter um melhor seguimento dos *subsets* foram criados algoritmos de correlação digital de imagem baseados em funções objetivo mais robustas, capazes de lidar com flutuações na iluminação, ruído na imagem e distorções geométricas do *subset*. Atualmente destacam-se as funções *Normalized Cross Correlation* (NCC), *Sum of Squared Differences* (SSD), *Zero-Mean Sum of Squared Differences* (ZSSD), *Normalized Sum of Squared Differences* (NSSD), *Zero-Mean Normalized Sum of Squared Differences* (ZNSSD) [69]. Esta última é mais conhecida e também a mais utilizada pela sua superior robustez, sendo a função objetivo definida pela expressão,

$$X^2ZNSSD: \sum \left( \left( \frac{\sum \bar{F} \bar{G}}{\sum \bar{G}^2} G(x', y') - \bar{G} \frac{\sum \bar{F} \bar{G}}{\sum \bar{G}^2} \right) - F(x, y) + \bar{F} \right)^2 \quad (2.6)$$

onde  $F(x, y)$  e  $G(x', y')$  representam, respetivamente, o mapa de intensidades antes e após a deformação do *subset*,  $\bar{F}$  e  $\bar{G}$  são os respetivos valores médios das intensidades, e  $(x, y)$  e  $(x', y')$  as respetivas coordenadas do centroide. A partir da relação entre ambas as coordenadas são determinados o campo de deslocamentos  $u$  e  $v$  ocorrido durante a deformação do corpo, sendo este dado por[70],

$$u = x' - x \quad (2.7)$$

$$v = y' - y \quad (2.8)$$

Para além da translação é permitido que o *subset* apresente rotação e distorção quando este evolui do estado de referência para o estado de deformação [70]. A adição destes graus de liberdade permite obter uma melhor correlação entre *subsets* e também determinar o campo de deformações do corpo, as quais são apresentadas na Figura 16 e descritas pelas equações (2.9), (2.10) e (2.11).

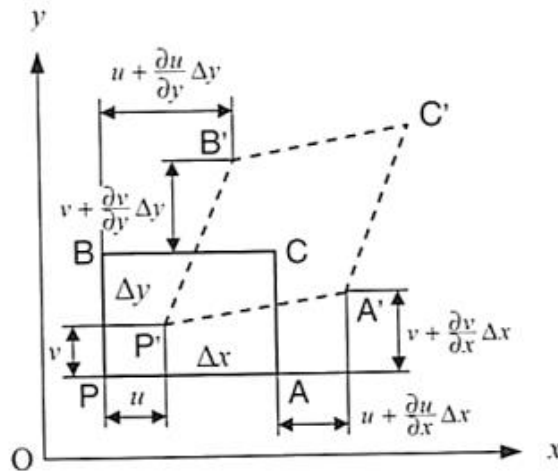


Figura 16 - Deformações de um *subset* (adaptado de [71])

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.11)$$

O processo de correlação dos *subsets* entre duas imagens conduz, na maioria das situações, a incrementos de deslocamentos e deformações inferiores à dimensão do pixel, designado de sub-pixel [52]. Para melhorar a sensibilidade desta técnica e poder identificar variações na ordem do sub-pixel, os níveis discretos de intensidade do *subset* são aproximados por funções contínuas, habitualmente por funções de interpolação *spline bilinear* ou *spline* cúbica, conforme se mostra no exemplo apresentado na Figura 17. A correlação dos *subsets* entre imagem é agora realizada a partir destas funções contínuas, o que permite, em teoria, alcançar resoluções entre 1/50 a 1/100 da dimensão do pixel, sem incremento significativo no tempo de processamento [51, 53, 71].

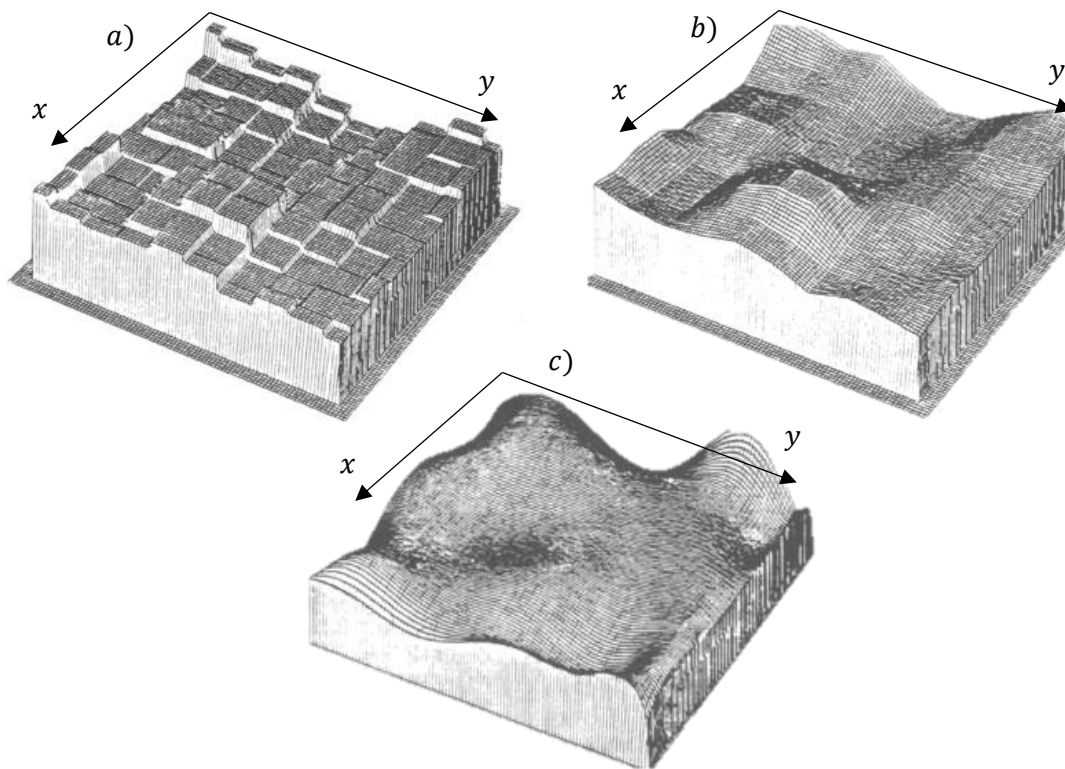


Figura 17 - a) Mapa de intensidade de um *subset*; b) campo de intensidade interpolada pela função *spline* bilinear; c) campo de intensidade interpolada pela função *spline* cúbica (adaptado de [72])



### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é descrito todo o trabalho preparatório para a realização dos ensaios experimentais, com o objetivo de identificar a curva tensão-deformação dos provetes em alumínio. Este inclui a descrição do processo de fabrico dos provetes e respetivo tratamento térmico, o processo de gravação do padrão de *speckle*, a descrição da barra de Hopkinson usada na realização dos ensaios, com a definição dos parâmetros de operação, e a montagem experimental para a aquisição das imagens de alta-velocidade, necessárias à medição do campo de deformações.

#### 3.1. Preparação dos provetes

##### 3.1.1. Fabrico dos provetes em alumínio AlSi10Mg

Os provetes foram fabricados pelo processo de SLM, com as dimensões consideradas adequadas à realização de ensaios de tração na barra de Hopkinson, as quais são estabelecidas pela dimensão das amarras e pela semelhança da impedância mecânica entre o provete e as barras. Os provetes foram produzidos na liga AL-Si10-Mg, dado ser uma liga de alumínio que apresenta características mecânicas superiores à maioria das restantes ligas e uma vasta gama de aplicações nos veículos de transporte, desde a indústria automóvel até à indústria aeroespacial. O processo de fabrico aditivo SLM apresenta um conjunto de vantagens relativamente aos processos convencionais, conforme já foi referido na secção 2.2.5. A flexibilidade deste processo de fabrico permite que a construção dos provetes seja realizada segundo três direções ortogonais. Por outro lado, a fusão do pó do material é feita através de uma fonte intensa de energia, que introduz um nível de tensões residuais relativamente elevadas, o que habitualmente se traduz numa redução das características mecânicas deste tipo de materiais. Este nível de tensões residuais nos provetes poderá ser reduzido através da posterior realização de tratamentos térmicos de revenido. Assim, neste trabalho pretende-se avaliar a influência da direção de impressão dos provetes e da aplicação do tratamento térmico de revenido no comportamento destes materiais, quando sujeitas a elevadas taxas de deformação. A máquina de SLM usada no fabrico dos provetes é da Renishaw®, modelo AM400, cuja imagem se apresenta na Figura 18.



Figura 18 - Máquina utilizada no fabrico dos provetes Renishaw®, modelo AM400

Esta possui como características principais:

- Um volume de trabalho de 250mm x 250mm x 300mm;
- Uma velocidade de impressão até  $20\text{cm}^3/\text{hr}$ ;
- Espessuras de camada desde 20  $\mu\text{m}$  até 100  $\mu\text{m}$ ;
- Permite o fabrico de peças nos materiais AlSi10Mg, CoCr, In625, In718, Aço inox 316L, Ti6Al4V;
- Um laser com potência de 400 W.

Através desta técnica foram fabricados 30 provetes na liga AL-Si10-Mg. Destes, 10 foram impressos com camadas transversais, 10 com camadas longitudinais e, por fim, 10 com camadas verticais, ver Figura 19. Metade de cada grupo de provetes, isto é 5, foram posteriormente submetidos a um tratamento térmico de revenido, através do aquecimento até  $250^\circ\text{C}$ , com estabilização durante 2 horas e arrefecimento rápido em água. Na Tabela 3 apresentam-se para cada subgrupo de provetes os desvios médios relativamente às dimensões de projeto.

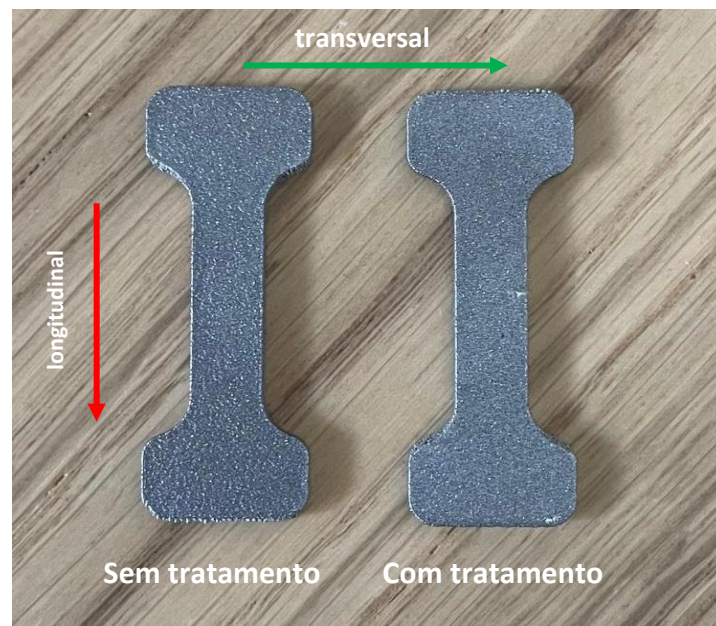


Figura 19 - Imagem dos provetes fabricados e respetivas dimensões. A seta a vermelho indica a direção de fabrico longitudinal (L), a seta a verde indica a direção de fabrico transversal (T) e por fim a seta a azul indica a direção de fabrico vertical (V)

Tabela 3 - Desvios médios por subgrupo de provetes relativamente às dimensões de projeto.

<b>Desvio Médio</b>	Longitudinal	Longitudinal T.	Transversal	Transversal T.	Vertical	Vertical T.
Espessura	1,216	1,208	1,214	1,21	1,492	1,494
Largura	0,196	0,202	0,568	0,544	0,184	0,172
Comprimento	0,694	0,78	0,13	0,18	0,174	8,402

### 3.1.2. Gravação do padrão de *speckle*

A produção do padrão de *speckle* na superfície do corpo é uma das etapas mais importantes na utilização da técnica de DIC. Em alguns casos, a textura natural da superfície já apresenta um padrão adequado à aplicação desta técnica, mas na maioria é necessário gerar um padrão de *speckle* artificial. No caso em concreto dos provetes fabricados em alumínio, foi necessário gravar um padrão na superfície através da técnica de transferência por adesão. Este processo permite controlar a dimensão do *speckle* e a sua distribuição ao longo da superfície, garantindo, igualmente, um elevado contraste na imagem o que se traduz na melhoria da resolução da técnica. O grão de *speckle* deve apresentar uma dimensão entre 2 a 5 pixels, valor recomendado pela literatura, podendo esta ser definida pela expressão [40].

$$d = \frac{p * l * n}{f_l} [m] \quad (2.12)$$

em que  $p$  representa a dimensão individual do pixel na câmara,  $l$  a distância até ao corpo,  $n$  o número de pixels de cada grão de *speckle* e  $f_l$  a distância focal da lente. Como alternativa, a dimensão do grão de *speckle* poderá ser definido de forma expedita com base na dimensão do corpo/pixel obtida num registo de imagem.

O padrão de *speckle* pode ser gerado numericamente através do programa comercial SpeckleGenerator da Correlated Solutions®, o qual permite controlar o diâmetro do grão de *speckle*, a densidade e a sua aleatoriedade. Na Figura 20 apresenta-se a interface do referido programa, onde se observa a distribuição do padrão de *speckle* em função dos parâmetros selecionados.

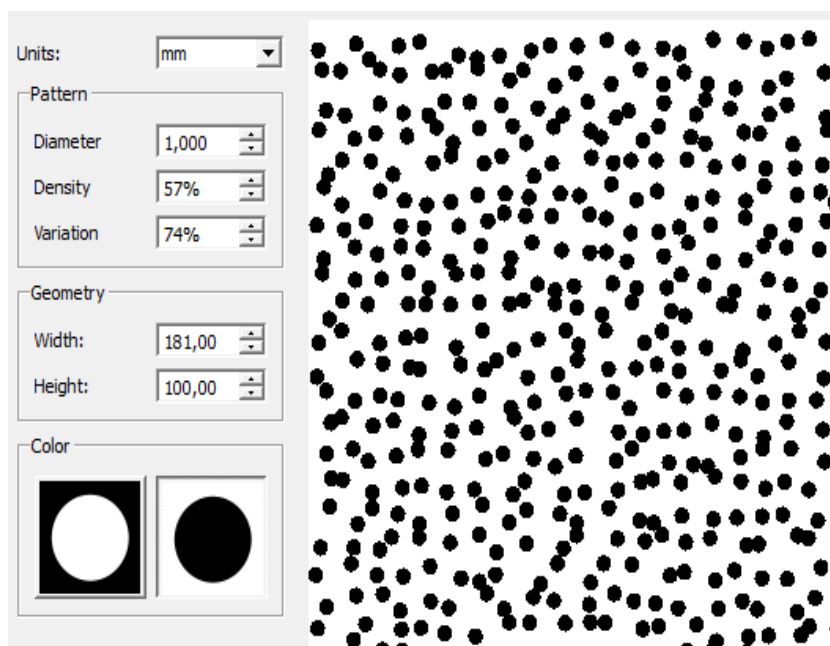


Figura 20 - Interface do programa de criação do padrão de *speckle*

No caso específico de se considerar um tamanho médio para o grão de 4 pixel e o registo de imagem a alta-velocidade apresentar uma relação de 6/100 mm/pixel, o tamanho de impressão do grão será de 24/100 mm. O padrão gerado de *speckle* é impresso numa folha plastificada, com recurso a uma impressora laser. Pretende-se, deste modo, reduzir a adesão do toner e facilitar o processo de transferência da folha para a superfície do provete. A superfície do provete é previamente pintada com tinta de alta temperatura de cor branca mate. A resistência da tinta a altas temperaturas é importante para garantir a sua boa adesão durante o ensaio, uma vez que este se caracteriza por ser um processo adiabático e as temperaturas geradas por este são muitos elevadas. A transferência do *toner* é realizada através do decalque da folha durante o processo de secagem da tinta. Na figura 21 apresentam-se o provete na etapa inicial, na etapa de pintura e na etapa de transferência do padrão de *speckle*.



Figura 21 - Várias etapas do processo de gravação do padrão de *speckle* na superfície dos provetes

## 3.2. Montagem experimental

### 3.2.1. Descrição do ensaio da tração na barra de Hopkinson

Com o objetivo de caracterizar o comportamento dinâmico do alumínio foi utilizada uma das barras de Hopkinson existentes nas instalações da UMAI do INEGI, localizada no campus da Faculdade de Engenharia do Porto. Esta Unidade tem desenvolvido as suas próprias barras, com o objetivo de permitir caracterizar o comportamento de diferentes materiais e perante diferentes solicitações. As barras existentes permitem realizar ensaios de compressão, tração e flexão em três pontos. A barra que foi usada neste trabalho é de tração, a qual foi inicialmente desenvolvida por Ferreira [1], no início dos anos 2000. Esta foi melhorada ao longo do tempo, sendo que a última atualização foi realizada por Shamchi S. [28].

A barra de Hopkinson utilizada nos ensaios experimentais desta dissertação é constituída por uma barra de impacto, barra de entrada e barra de saída. Todas estas fabricadas em titânio, com um módulo de elasticidade de 105 GPA e uma tensão de cedência de 275 MPa. A barra de entrada e barra de saída possuem um comprimento de 5700 mm e 2500 mm, respetivamente. Para garantir a geração de um impulso com duração suficiente para conduzir à rotura do provete é utilizada uma barra de impacto com comprimento de 2000 mm. Para minimizar o efeito do atrito entre a barra e os apoios, estes são formados por casquilhos em teflon com canais para injeção de ar comprimido, ver Figura 22.



Figura 22 - Apoios das barras em teflon preparado com canais para passagem de ar comprimido

O sistema inicial de disparo desenvolvido por [1], era formado por um reservatório de pressão e uma válvula de disparo rápido. Posteriormente, o sistema foi melhorado através da incorporação de um *pressure booster*, ver Figura 23, o qual permitiu incrementar a pressão de disparo e, conseqüentemente, a velocidade do impactor. Deste modo, tornou possível gerar impactos de maior energia e ensaiar provetes em alumínio, aço, etc.



Figura 23 - *Pressure booster*, melhoria introduzida no sistema para permitir aumentar a pressão do sistema

### 3.2.2. Instrumentação da barra e pós-processamento dos sinais

As ondas de tração e compressão geradas pelo impactor são registadas por um par de extensómetros montados na barra de entrada e saída, respetivamente. A sua localização foi estudada para evitar sobreposição da onda incidente e refletida. Os extensómetros possuem uma resistência de 350  $\Omega$  e um fator de sonda de 2.17, sendo estes ligados em meia ponte de Wheatstone para medir o valor médio da deformação gerada pela passagem das ondas.

Através da análise das curvas de deformação no tempo das ondas incidente, refletida e transmitida é extraída a curva tensão-deformação do provete ensaiado.

As deformações produzidas são registadas na forma de sinal elétrico através de um osciloscópio de 4 canais da PicoScope®, modelo 4424, visível na Figura 24. Este permite adquirir os sinais a uma taxa de  $20 \times 10^6$  amostras por segundo, o que se mostra suficiente para registar adequadamente no tempo as deformações produzidas na barra. Os sinais adquiridos são posteriormente transferidos para computador para serem processados.



Figura 24 - Osciloscópio de quatro canais da Pico Technology®, modelo 4424

Para obtenção da curva tensão-deformação, os sinais são pós-processados através do programa SURE-Pulse® da empresa Relinc, Inc®. O processamento requer a identificação da onda incidente, refletida e transmitida. As correspondentes ondas de tensão são determinadas conhecidas as propriedades elásticas do material, dimensões das barras, características dos extensómetros e a sua localização. Posteriormente estes sinais são combinados de modo a extrair a curva tensão-deformação do material ensaiado. Segue-se uma descrição mais detalhada do processamento dos sinais.

Na primeira etapa é requerido a definição de parâmetros intrínsecos da barra de Hopkinson, como as propriedades elásticas das barras e o respetivo comprimento. São igualmente indicadas a localização e as características dos extensómetros, bem como, a tensão de alimentação da ponte de Wheatstone. Na Figura 25 apresenta-se uma imagem da interface gráfica para introdução destes parâmetros.

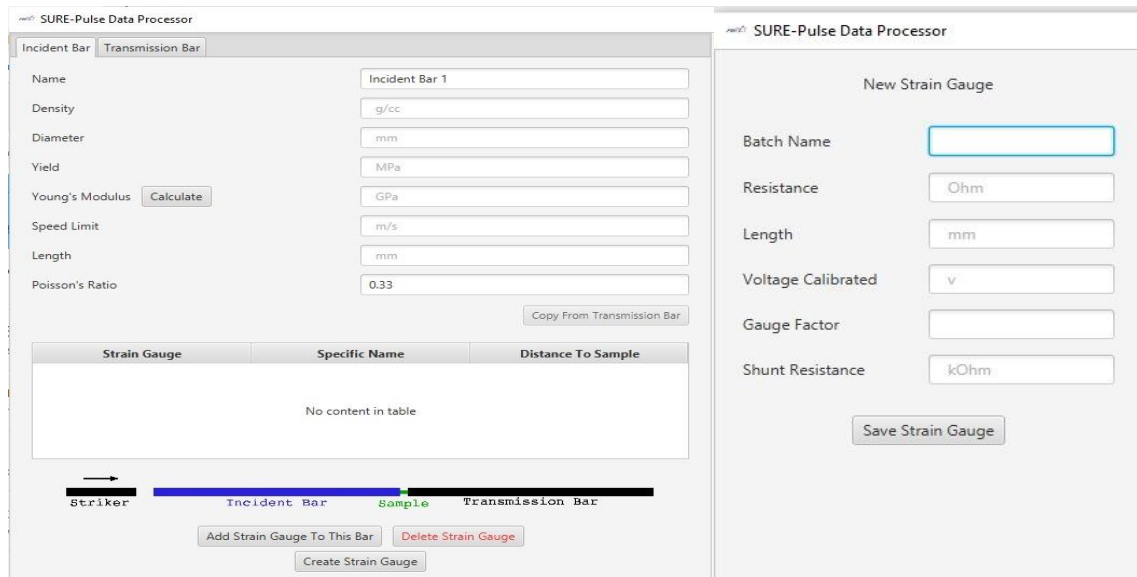


Figura 25 - Introdução das características da barra no programa Surepulse® da empresa Relinc Inc®

Na segunda etapa são introduzidas as características geométricas dos provetes e algumas das propriedades elásticas do material correspondente, sendo lido os ficheiros do registo no tempo do sinal elétrico produzido pelos extensómetros. Seguidamente, são definidas as regiões de interesse dos sinais correspondentes às ondas incidente, transmitida e refletida. O programa apresenta as curvas de resultados, entre as quais se destacam a curva tensão-deformação, extensão-tempo, deformação-tempo e taxa de deformação-tempo, conforme se pode observar na Figura 26. A partir da análise da curva taxa de deformação-tempo pode ser medido o valor médio desta taxa.

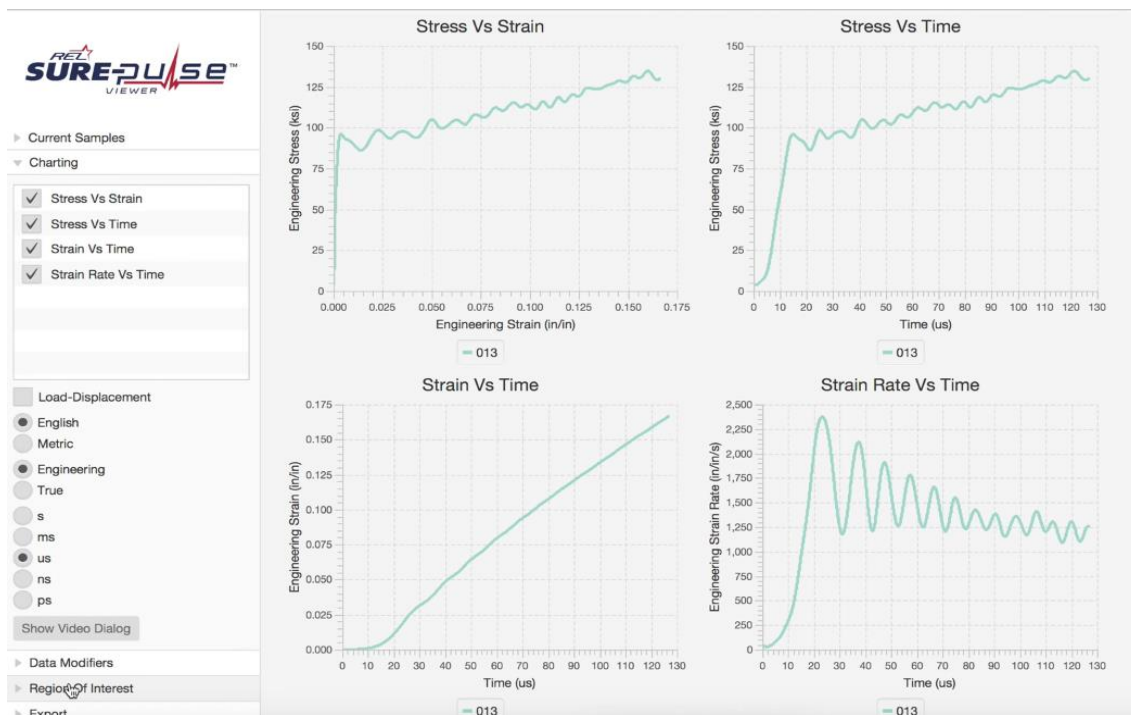


Figura 26 - Apresentação das curvas de resultados através do programa Surepulse® da empresa Relinc Inc®

### 3.2.3. Aquisição de imagens a alta velocidade

Ensaios a médias e elevadas taxas de deformação são utilizados para estudar o comportamento mecânico de materiais. Tal comportamento é previsto com base nas curvas de tensão-deformação obtidas. Logo é de real importância a necessidade do uso de técnicas de medição precisas para analisar o seu comportamento durante a deformação, como a técnica DIC. Trata-se de um processo não invasivo de medição baseado no registo de imagens e análise da evolução de padrões durante o processo de carregamento do material. Este permite seguir o campo de deslocamentos e deformações geradas na superfície do provete à taxa de aquisição das imagens. Na Figura 27 é apresentada a imagem da montagem experimental utilizado na caracterização do comportamento à tração de provetes de alumínio.

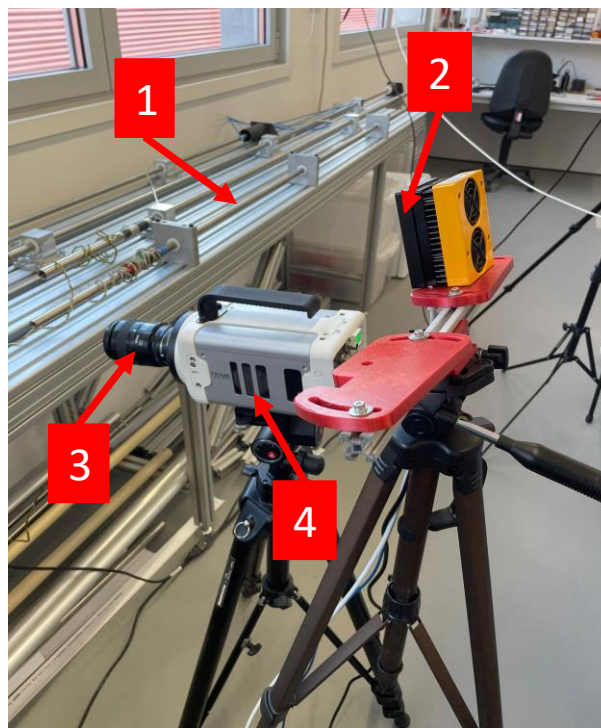


Figura 27 - Imagem da montagem experimental para o ensaio à tração de provetes em alumínio: (1) Barra de Hopkinson; (2) Iluminação GSVITEC MultiLed QT; (3) Lente Nikon AF Micro Nikkor 60mm f/2.8 D; (4) Câmera de alta-velocidade Photron FastCam Nova-S

A utilização de uma câmara de alta-velocidade é de grande importância para o registo de fenómenos rápidos, como os realizados na barra de Hopkinson. Neste trabalho foi usada uma câmara de alta-velocidade Photron® FastCam Nosa-S, a qual foi sincronizada com o disparo do impactor para permitir o registo de uma sequência de imagens durante a solitação do provete. No que se refere aos parâmetros da câmara de alta-velocidade, foi necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre a resolução das imagens e a taxa de aquisição. Assim, tendo como referência o número mínimo de imagens para o acompanhamento da deformação do provete, foi selecionada uma taxa de aquisição de 90 000 imagens por segundo, correspondendo à resolução máxima de 512x128 pixels. O tempo de exposição de cada fotograma foi reduzido ao mínimo de 200 ns, com a utilização de fonte de luz branca intensa e uniforme, proveniente do foco MultiLed QT. O controlo da câmara foi realizado através do programa fornecido pelo fabricante da câmara Photron Fastcam Viewer 4®, o qual permitiu sincronizar a aquisição com o evento e definir a região de interesse. Neste caso, foi necessário estender o campo de visão para além do provete, ver Figura 28, devido ao deslocamento do corpo rígido que ocorre durante o ensaio.

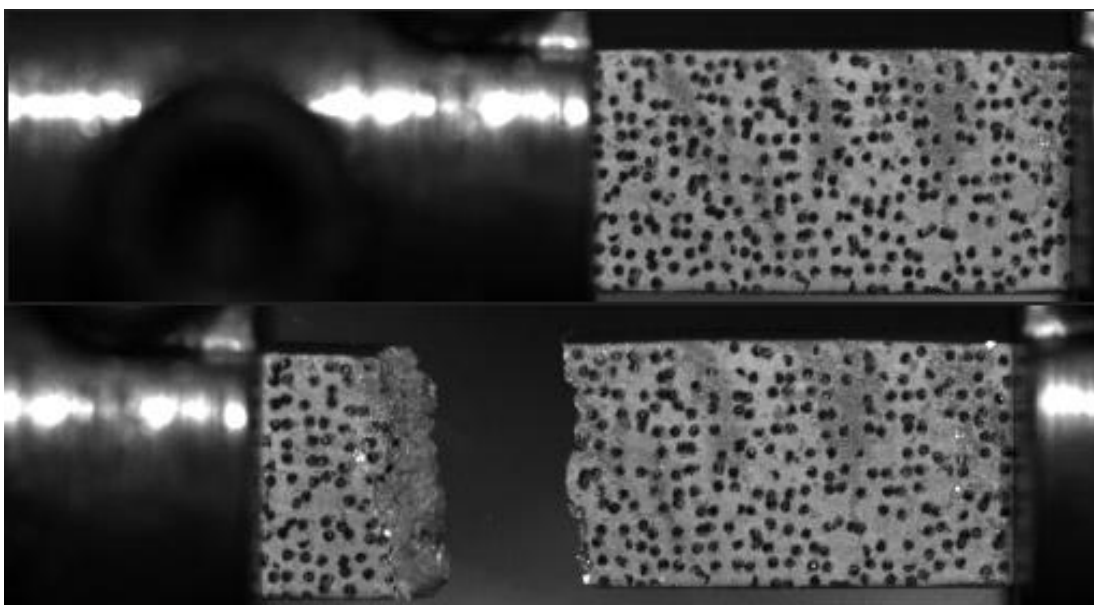


Figura 28 - Campo de visão da câmara de alta-velocidade do provete antes e após o ensaio.

### 3.2.4. Determinação dos campos de deslocamentos e deformações pela técnica DIC-2D.

Para determinar os campos de deslocamentos e deformações gerado a partir do registo de imagens, estas são processadas usando o programa comercial Gom Correlate®. Inicialmente as imagens são carregadas para o programa, sendo apenas as que correspondem à deformação do provete até à rotura. Para a avaliação do campo de deslocamentos é necessário definir uma distância conhecida, neste caso a largura do provete. Segue-se a definição da área de interesse, a dimensão do *subset* e respetivo passo, a função de interpolação e a função objetivo. Na Figura 29 é apresentada a interface com o programa da Gom Correlate® para o processamento das imagens de alta-velocidade.

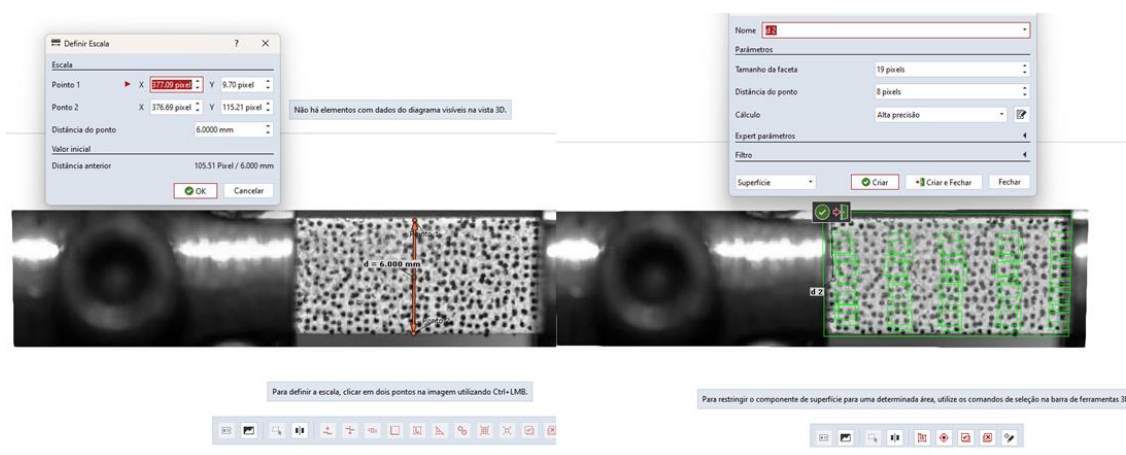


Figura 29 - Processamento das imagens de alta-velocidade no programa Gom Correlate®

Refira-se que a dimensão do *subset* e respetivo passo determinam a resolução espacial da medição, enquanto a função objetivo e a função de interpolação estão relacionadas com a precisão do processo de correlação de imagem. Por último, é criado um extensómetro virtual na região correspondente à rotura, conforme é mostrado na Figura 30, o qual permite integrar a deformação produzida entre dois pontos seleccionados.

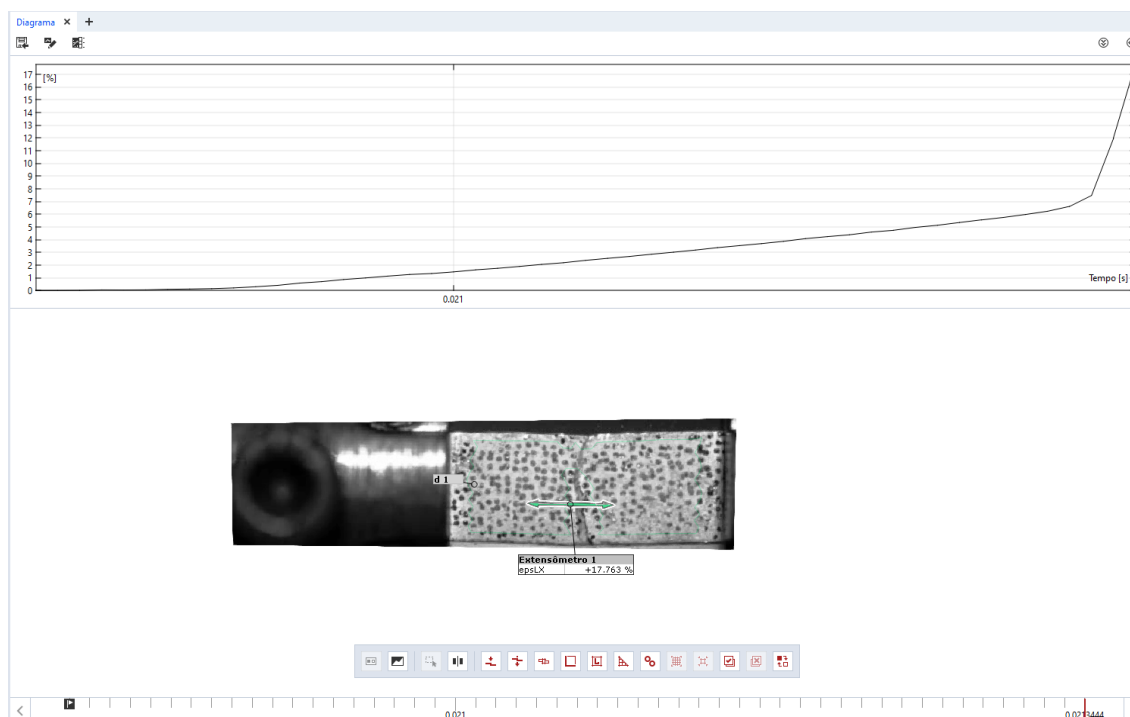


Figura 30 - Criação do extensómetro virtual e obtenção da curva Extensão-Tempo

### 3.2.5. Procedimento para os ensaios de tração na barra de Hopkinson

O procedimento experimental foi inicialmente definido para garantir a consistência nas medições e elevada qualidade dos dados recolhidos. Este começa pela fixação dos provetes às amarras e medição da distância entre amarras. Especial cuidado é prestado no processo de fixação dos provetes, para não introduzir desalinhamentos e originar fenómenos de torção durante os ensaios. Segue-se o alinhamento e o campo de visão da câmara de alta-velocidade e o ajuste da iluminação, para o registo adequado das imagens. O sistema de aquisição de sinal dos extensómetros é ativado para o registo dos sinais após o sinal de disparo. Após este, é ativado o sistema de alimentação de ar comprimido que vai alimentar os casquilhos em nylon para criar uma almofada de ar e, assim, reduzir o atrito entre as barras e os apoios. Por último, é pressurizado o reservatório de pressão, *pressure booster*, até ao nível pretendido e realizado o disparo. Os sinais dos extensómetros e as imagens de alta-velocidade são recolhidos para posterior análise.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUÇÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se as curvas tensão-deformação e os campos de deslocamentos e deformações obtidos através dos ensaios de tração na barra de Hopkinson para provetes em alumínio fabricados em SLM, com diferentes direções de impressão e tratamentos térmicos. São igualmente enumeradas as anomalias observadas na montagem dos provetes, durante a realização dos ensaios e no pós-processamento dos dados recolhidos. A qualidade dos resultados obtidos pela técnica de correlação digital de imagem é avaliada por comparação com as medições realizadas por extensometria. Por fim, é apresentado um estudo do comportamento dos provetes função direção de fabrico e tratamento térmico

### 4.1. Correção dimensional dos provetes e caracterização dos parâmetros do ensaio da técnica de DIC.

Neste trabalho foram ensaiados um total de 31 provetes em alumínio, fabricados para três direções ortogonais de fabrico, sendo que alguns foram posteriormente submetidos a tratamento térmico. Aquando da realização dos ensaios experimentais verificou-se que os provetes apresentavam dimensões superiores às especificadas e, principalmente, às dimensões das amarras. Pelo que foi necessário corrigir as dimensões dos provetes através da remoção de material por abrasão. Numa fase inicial foi usada uma lima, a qual introduzia concentração de tensões nas regiões assinaladas por um círculo a vermelho na Figura 31, evidenciado pela ocorrência de fraturas principalmente nos provetes com impressão na direção transversal. Por esse motivo, passou a usar-se uma lixa com granulometria de 240. Apesar deste processo ser mais moroso, garantia maior uniformidade na remoção de material e, assim, regiões sem concentração de tensões. As dimensões a serem corrigidas nos provetes são função da direção de fabrico dos provetes, pelo que nos provetes com impressão nas direções longitudinal e vertical foi removido material das superfícies (A) e (B), e nos para a direção transversal foi removido material da superfície (C), ver Figura 31.

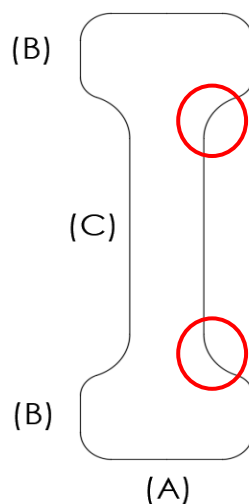


Figura 31 - Regiões do provete submetidas à correção dimensional, através do desbaste por abrasão

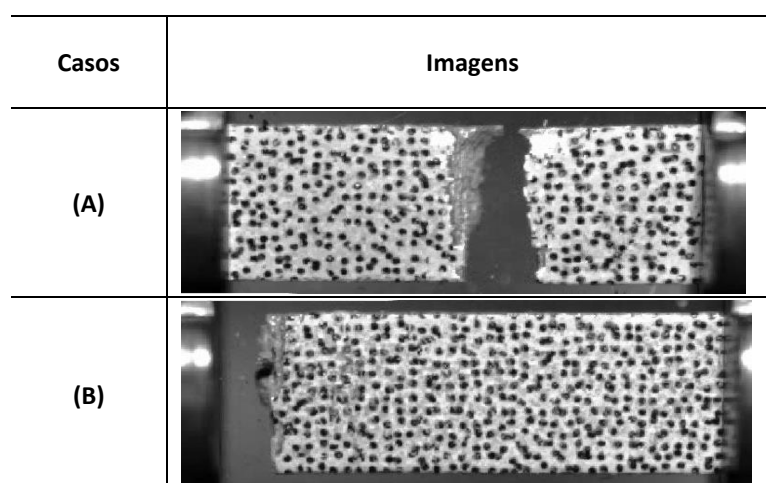
A Tabela 4 apresenta o número de ensaios realizados, função da direção de fabrico e deste ser sujeito ou não a tratamento térmico. A designação dos provetes é feita por abreviatura de forma a facilitar a sua escrita e identificação. Função da direção de fabrico, estas passam a ser designadas por vertical (V), transversal (T) e longitudinal (L). Esta letra pode ser sequenciada pela letra T, caso o provete seja submetido posteriormente a um tratamento térmico de revenido. Assim, a designação de (LT) corresponde aos provetes com fabrico na direção longitudinal e posterior tratamento térmico, enquanto (L) corresponde ao provete com fabrico na direção longitudinal, mas sem posterior tratamento térmico.

Tabela 4 - Número de provetes ensaiados para cada direção de fabrico e função do tratamento térmico

<b>Designação</b>	<b>Número de Provetes Ensiados</b>
V	5
VT	3
T	4
TT	7
L	8
LT	4

Inicialmente considerou-se o mínimo de 3 ensaios para caracterizar o comportamento do material. Todavia, verificou-se com o decorrer dos ensaios que alguns provetes apresentavam fraturas em regiões junto e no interior das amarras, o que impossibilitava a análise do seu campo de deslocamentos e deformações pela técnica de DIC. Na Tabela 5 apresentam-se exemplos de fraturas observadas na realização dos ensaios. No exemplo (A), a fratura ocorreu na região mediana, o que permitiu ser analisada pela técnica DIC, enquanto no exemplo (B), a fratura ocorreu no interior da amarra, o que impossibilitava a sua análise pela mesma técnica.

Tabela 5 - Casos distintos de fraturas obtidas durante o ensaio de tração



Os parâmetros de ensaio foram sendo ajustados em função dos resultados obtidos na sequência de ensaios, com o objetivo de melhorar a qualidade dos dados e, assim, obter uma melhor caracterização dos materiais. Na Tabela 6 são apresentados a sequência do ensaio, o tipo de provete ensaiado, a pressão de disparo do impactor, a taxa de aquisição das imagens, o tempo de exposição do fotograma e a resolução das imagens adquiridas. A pressão aplicada ao impactor subiu de 8 bar para 10 bar, motivado pela fraca qualidade dos sinais medidos. Quanto aos parâmetros de registo de imagem de alta-velocidade, verificou-se que o número de imagens para o registo do evento era insuficiente, pelo que este foi inicialmente ajustado de 50 000 fps para 64 000 fps e, posteriormente, para 90 000 fps, com a conseqüente redução da resolução da imagem. O tempo de exposição de cada imagem foi reduzido de 1/200 000 s para 1/500 000 s através do incremento da iluminação da superfície do provete, com o objetivo de reduzir o arrasto e melhorar o contraste do padrão de *speckle*.

Tabela 6 - Parâmetros selecionados na barra de Hopkinson e para o sistema de captura de imagens no decorrer dos ensaios de todos os provetes

Ensaio	Provetes	Pressão	FPS	Shutter	Resolução	Taxa de def. extensometria
1	TT	8	50 000	1/200 000	640 X 176	250,54
2	V	8	50 000	1/200 000	640 X 176	239,87
3	VT	8	50 000	1/200 000	640 X 176	227,68
4	T	10	50 000	1/200 000	640 X 176	216,20

<b>Ensaio</b>	<b>Provetes</b>	<b>Pressão</b>	<b>FPS</b>	<b>Shutter</b>	<b>Resolução</b>	<b>Taxa de def. extensometria</b>
5	L	10	50 000	1/200 000	640 X 176	200,30
6	LT	10	50 000	1/200 000	640 X 176	232,30
7	T	10	64 000	1/200 000	512 X 144	224,71
8	TT	10	64 000	1/200 000	512 X 144	239,88
9	L	10	64 000	1/200 000	512 X 144	218,72
10	LT	10	64 000	1/200 000	512 X 144	245,16
11	V	10	64 000	1/200 000	512 X 144	249,12
12	VT	10	64 000	1/200 000	512 X 144	261,97
13	L	10	90 000	1/500 000	512 X 128	212,30
14	L	10	90 000	1/500 000	512 X 128	258,42
15	L	10	90 000	1/500 000	512 X 128	249,20
16	LT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	268,59
17	LT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	243,06
18	T	10	90 000	1/500 000	512 X 128	262,56
19	T	10	90 000	1/500 000	512 X 128	265,27
20	TT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	294,24
21	V	10	90 000	1/500 000	512 X 128	291,62
22	V	10	90 000	1/500 000	512 X 128	281,70
23	VT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	250,67
24	V	10	90 000	1/500 000	512 X 128	287,40
25	V	10	90 000	1/500 000	512 X 128	243,93
26	V	10	90 000	1/500 000	512 X 128	254,43
27	V	10	90 000	1/500 000	512 X 128	245,50
28	TT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	245,38
29	TT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	253,37
30	TT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	245,50
31	TT	10	90 000	1/500 000	512 X 128	280,74

## 4.2. Resultado dos ensaios

Os sinais registados pelos extensómetros apresentam naturalmente algum ruído experimental, o qual pode ser atenuado através de aplicação de filtros passa-baixo. Neste caso, implementou-se um programa em MATLAB® que permite, através da aplicação da média deslizante móvel, atenuar o ruído de alta frequência. Estes foram aplicados aos sinais da onda incidente, transmitida e refletida, antes de serem processados no programa Sure-Pulse®. Na Figura 32 apresenta-se a curva tensão deformação antes e após a aplicação do filtro passa-baixo, sendo evidente que a tendência da curva filtrada é mais suave do que a curva não filtrada.

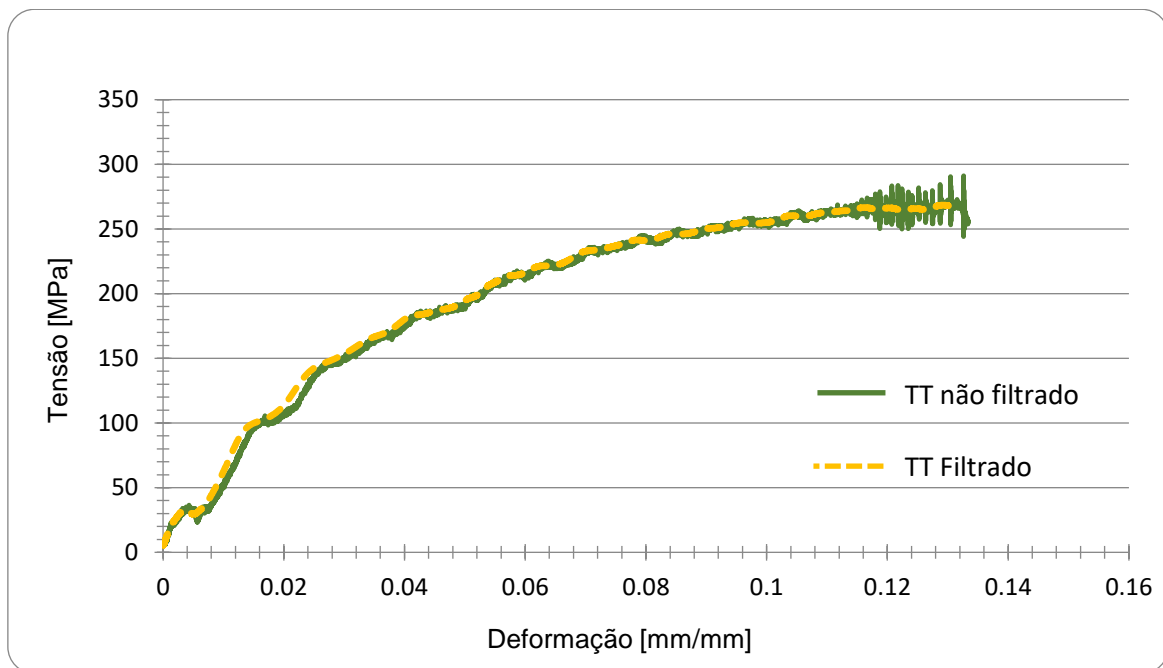


Figura 32 - Curva tensão-deformação antes e após a filtragem dos sinais

Contudo, é normal que na realização de ensaios experimentais nem todos os resultados sejam válidos devido a apresentarem comportamentos anómalos, devendo, por isso, serem excluídos do estudo. Exemplo desta anomalia no comportamento do material é apresentada na Figura 33, onde se observa na fase inicial do ensaio um declive inferior ao esperado e posteriormente um aumento desse declive, o qual pode ser justificado pelo aumento da área de contacto entre o provete e a amarra e por isso ocorra um aumento da rigidez local.

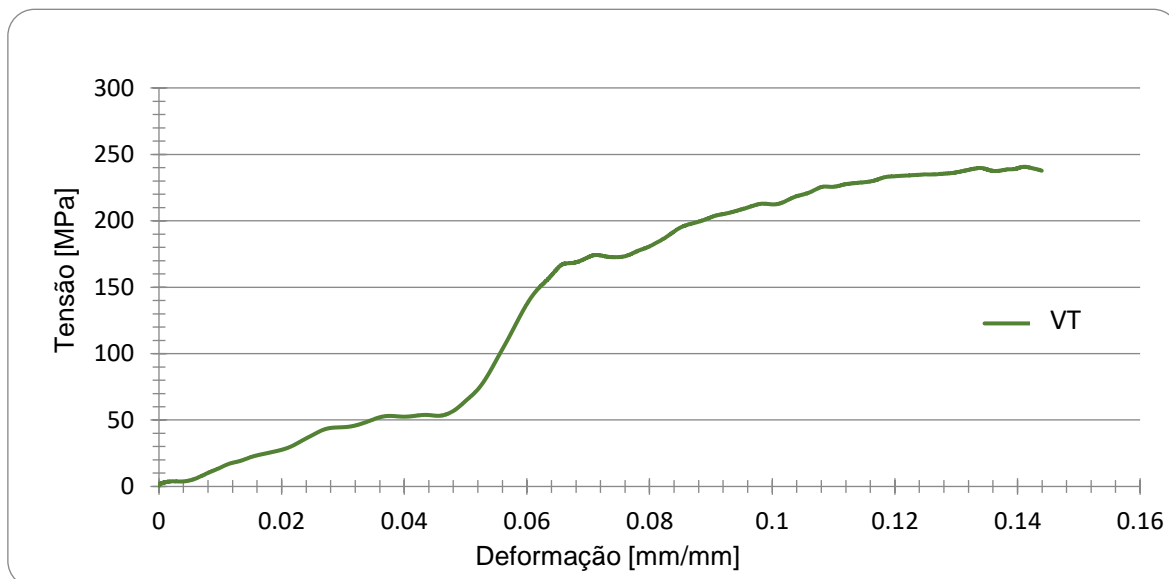


Figura 33 - Curva tensão-deformação que evidencia o fenómeno de aumento de rigidez local entre o provete e amarra

É importante ressaltar que a tecnologia utilizada para a fabricação destes é relativamente recente e ainda não está totalmente controlada. Assim, foi então necessário excluir alguns dos ensaios do estudo, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados. Para garantir consistência na análise dos resultados, é necessário obter resultados em pelo menos três ensaios válidos. Por esse motivo, foi necessário realizar mais ensaios para além dos inicialmente previstos, ver Tabela 4

#### 4.2.1. Avaliação do efeito da direção de fabrico e do tratamento térmico

Conforme já referido, pretende-se estudar a influência da direção de fabrico e do tratamento térmico de revenido, no comportamento do alumínio AISi10Mg à tração. Refira-se que o processo de fabrico envolve a utilização de uma fonte de energia muito concentrada para a fusão do material, o que provoca a expansão e contração do material em cada região, levando ao aparecimento de tensões residuais. Este processo ocorre camada a camada, pelo que a expansão térmica do material será função da área da camada, a qual depende da direção de fabrico do provete. Por outro lado, a fusão do material na camada superior resulta também no aquecimento do material solidificado nas camadas imediatamente inferiores, o que se traduz no alívio das tensões residuais. Assim, será espectável o nível de tensões residuais instalado no provete seja função da direção em que foi construído. No que se refere ao tratamento térmico de revenido aplicado aos provetes após o seu fabrico, pretende reduzir e uniformizar as tensões residuais instaladas nos provetes. O estudo que se segue pretende avaliar o efeito da direção de fabrico dos provetes e da aplicação do tratamento térmico de revenido no comportamento do alumínio à tração. Esta realizar-se-á através da comparação das curvas tensão-deformação para as direções de fabrico e aplicação ou não do tratamento térmico de revenido. Nas figuras 34, 35 e 36 são comparadas as curvas tensão-deformação com e sem tratamento térmico, para as direções de fabrico vertical, transversal e longitudinal.

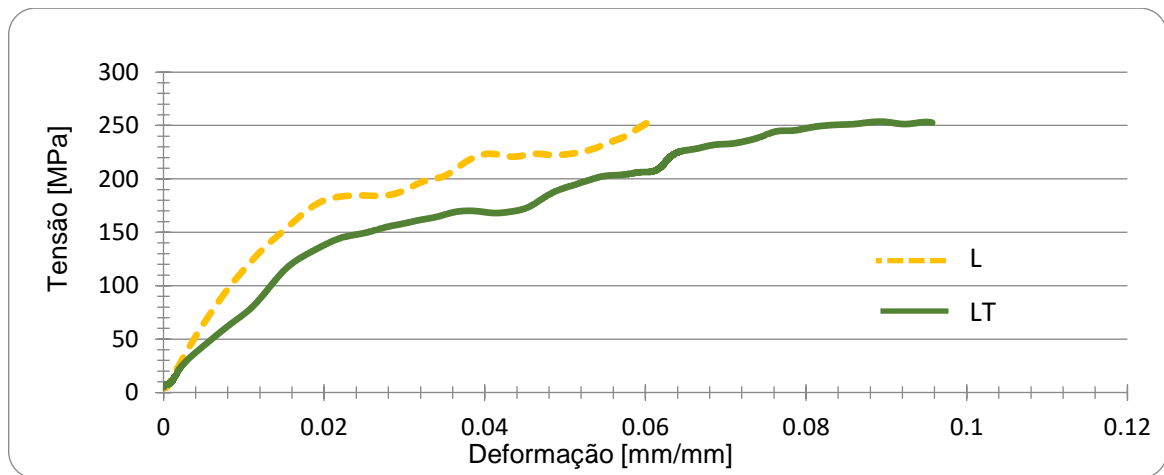


Figura 34 - Tensão-Deformação para os provetes com direção de fabrico Longitudinal, com e sem tratamento térmico

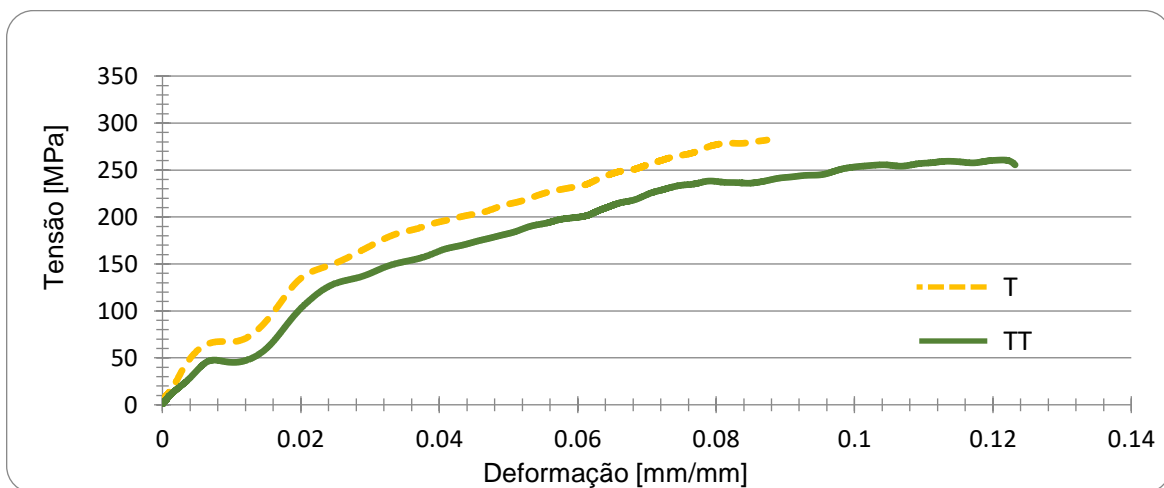


Figura 35 - Tensão-Deformação para os provetes com direção de fabrico Transversal, com e sem tratamento térmico

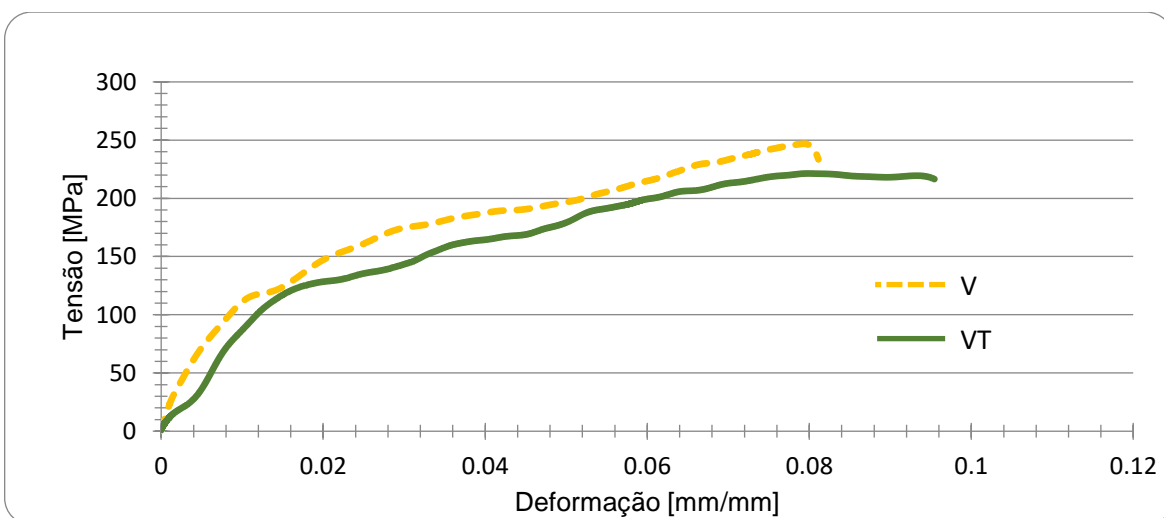


Figura 36 - Tensão-Deformação para os provetes com direção de fabrico Vertical, com e sem tratamento térmico

A análise comparativa das curvas tensão-deformação revela que o tratamento térmico de revenido é eficaz na redução das tensões residuais para as três direções de fabrico dos provetes, revelado pelo aumento da ductilidade e redução da tensão de rutura do material. Este resultado indica que o tratamento é fundamental na melhoria das propriedades mecânicas dos provetes impressos em alumínio pelo processo SLM. As tensões residuais criadas por este processo, conduzem a comportamento mais frágil do alumínio. Com o objetivo de quantificar a melhoria na ductilidade no comportamento do alumínio, foi determinada, a partir das curvas tensão-deformação, a energia elasto-plástica. Os resultados obtidos das três direções de fabrico e para os casos com e sem tratamento térmico de revenido são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores médios da energia elasto-plástica para as três direções de fabrico dos provetes, com e sem tratamento térmico

Direção de Fabrico	Sem tratamento térmico			Com tratamento térmico			Média sem tratamento térmico	Média com tratamento térmico
V	1.835 J	1.741 J	1.913 J	1.844 J	2.911 J	2.262 J	1.830 J	2.339 J
L	1.297 J	1.411 J	1.534 J	2.571 J	2.852 J	2.452 J	1.414 J	2.625 J
T	2.034 J	2.603 J	2.335 J	3.737 J	3.587 J	3.491 J	2.324 J	3.605 J

A análise dos valores médios da energia elasto-plástica sem tratamento térmico revela que esta é máxima para direção transversal e mínima para a direção longitudinal, respetivamente, com os valores 2.324 Joule e 1.414 Joule. A aplicação do tratamento térmico de revenido resultou globalmente numa melhoria significativa da energia elasto-plástica, com destaque para as direções longitudinal e transversal. Este mostrou-se ser menos eficaz para a direção vertical, onde o incremento da energia foi menos significativo. Estes últimos resultados estão diretamente relacionados com o processo de fabrico do provete, onde a energia fornecida deverá ser suficiente para fundir o material depositado e promover a sua ligação à superfície superior da peça. Pelos resultados obtidos, verifica-se que a energia elasto-plástica é inferior da direção de fabrico longitudinal antes da aplicação do tratamento térmico de revenido, sendo também esta a situação em que o percurso do laser é superior, levando a concluir que esta é a condição com maiores gradientes térmicos e por isso com maior nível de tensões residuais. Pelo contrário, o laser apresenta um percurso inferior para a direção vertical. Por outro lado, a energia introduzida por laser deve ser suficiente para a fusão de todo o alumínio depositado. Caso contrário, irão surgir vazios nessa camada, com a conseqüente redução da sua resistência mecânica. No caso do fabrico dos provetes na direção vertical, há maior probabilidade que os vazios se encontrem alinhados na seção resistente. Esta poderá ser uma das justificações para o valor da energia elasto-plástica ser inferior na direção vertical relativamente às outras direções, após a aplicações do tratamento térmico de revenido.

### 4.2.2. Campos de deslocamentos e deformações obtidos pela técnica DIC

Paralelamente ao registo das deformações geradas pela propagação das ondas, através da utilização de extensómetros elétricos, foram registadas as imagens de alta-velocidade da superfície do provete durante o ensaio. Estas imagens serão pós-processada pela técnica DIC, com o objetivo de avaliar a evolução do campo de deslocamentos e deformações do provete, gerados pela propagação da onda de tração. Esta técnica permite avaliar a distribuição de deslocamentos e deformações no provete, o qual não é conseguido a partir da medição das ondas de deformações medidas nas barras de entrada e saída. Acresce que a técnica DIC permite identificar zonas de concentração de tensões e identificar anomalias no comportamento do provete.

Na Figura 37 são apresentados dois exemplos da evolução do campo de deformações medido por esta técnica, desde o início da solicitação até à rutura completa do provete. Refira-se que o registo completo do campo de deformações em média era composto por 45 imagens.

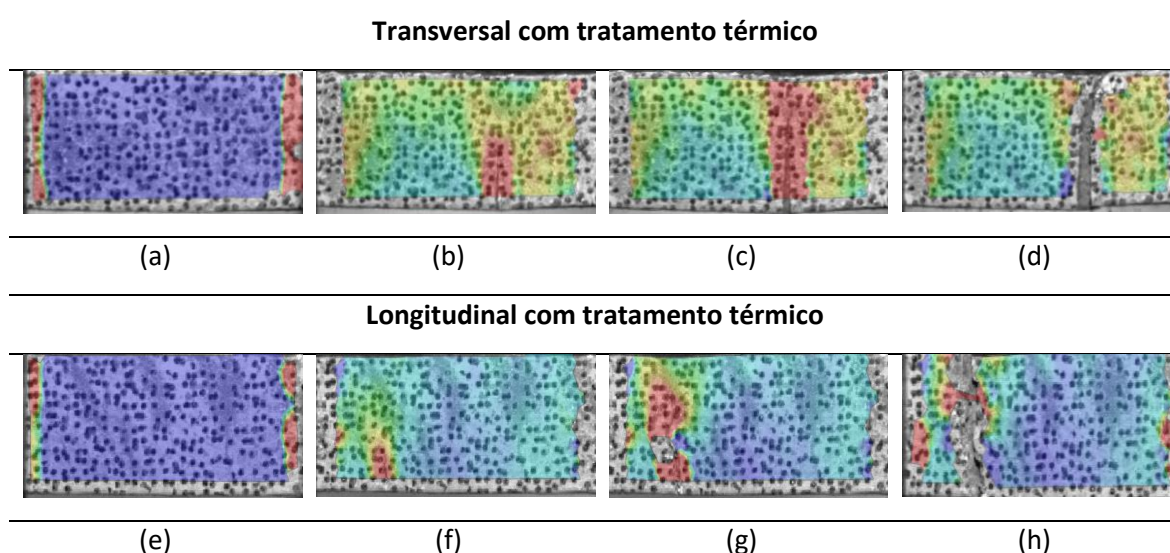


Figura 37 - Representação do campo de deformações determinado através da técnica DIC e para diferentes instantes: (a) e (e) início do ensaio, (b) e (f) antes da rutura, (c) e (g) durante a rutura, (d) e (h) após a rutura

Na fase inicial do ensaio é observado deformações de pequena amplitude na região do provete juntos à fixação. Isto indica que o nível de aperto dos parafusos que são usados para fixar as extremidades do provete às barras é adequado. No caso de este ser realizado em excesso, conduzirá à concentração de tensões e à rutura do provete nesta região.

O campo de deformações registado imediatamente antes do início da rutura revela uma região com elevada amplitude, representada a vermelho. O início do processo de rutura do provete é confirmado pelo campo de deformações medido durante este processo, ver Figura 37.

Conforme se pode observar pela elevada amplitude de deformação, a rutura dá-se na direção transversal do provete. Por fim, apresenta-se o campo de deformações após a rutura com a separação de duas partes do provete.

Para além da medição do campo de deformações, a técnica também permite observar desvios no carregamento, o que provoca no provete esforços combinados de tração e flexão. Estes são habitualmente provocados por desalinhamento do provete relativamente às barras. No entanto, este também pode ocorrer quando a onda gerada não é plana e surge distorcida devido a defeitos internos nas barras.

### 4.2.3. Comparação de resultados entre as duas técnicas

A técnica DIC fornece mais informação sobre o comportamento do provete durante o seu carregamento. Contudo, o seu registo é mais espaçado no tempo relativamente às deformações registados por extensometria elétrica. Por seu lado, as deformações geradas pelo impacto deverão ser registadas a uma elevada taxa para que a curva tensão-deformação seja determinada com elevada precisão. É importante saber que as duas técnicas se complementam e permitem uma caracterização de materiais mais detalhada. Apesar destas apresentarem diferentes taxas de amostragem, a evolução da deformação no tempo deve ser semelhante. Na Figura 38 são comparadas as curvas da deformação no tempo obtidas pelas duas técnicas, referente ao ensaio de um provete fabricado na direção transversal e submetido a tratamento térmico de revenido. No caso da técnica DIC, a curva resultou da integração das deformações ao longo do comprimento útil do provete, através da criação de um extensómetro virtual.

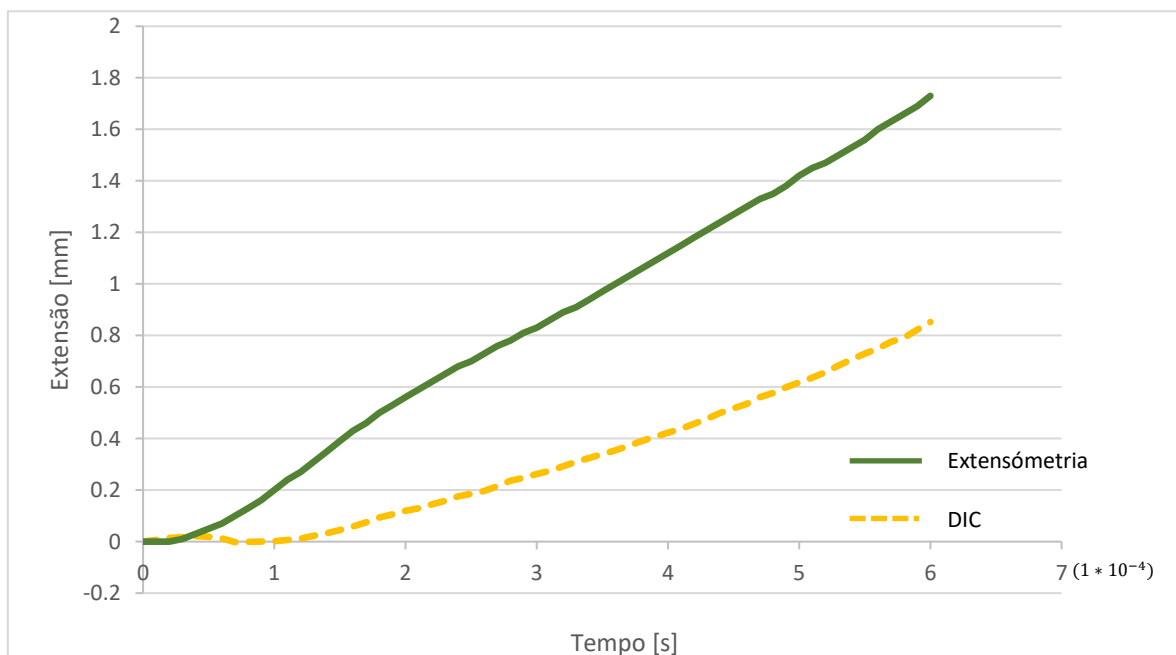


Figura 38 - Comparação das curvas deformação-tempo obtidas por extensometria e pela técnica DIC

Conforme se pode observar, ambas as curvas apresentam a mesma tendência. Contudo, verifica-se que a técnica DIC apresenta valores inferiores de deformação relativamente à extensometria. Tal resultado já era esperado, uma vez que a técnica DIC não é capaz de quantificar a deformação do provete que ocorre dentro das amarras. De facto, a região da sua fixação do provete não está visível para a câmara, pelo que os padrões de *speckle* não podem ser seguidos e a sua deformação avaliada por esta técnica. Refira-se que a técnica DIC se baseia no registo de imagem. A elevada quantidade de informação contida em cada imagem e as limitações das câmaras, obrigam que as taxas de amostragem sejam substancialmente inferiores aos dos extensómetros. Pelo que a falta de resolução temporal pode igualmente originar valores na deformação inferiores.



## 5. CONCLUSÃO

Relativamente ao fabrico dos provetes, verificou-se que algumas das suas dimensões excediam as de projeto, principalmente para os provetes fabricados na direção transversal. Pelo que foi necessário posteriormente serem corrigidas através da remoção de material por abrasão, para poderem ser montadas e ensaiadas na barra de Hopkinson. No entanto, este processo conduziu ao aparecimento de zonas de maior fragilidade e influenciou os resultados obtidos. Para a medição do campo de deformações com a técnica DIC foi necessário gravar na superfície dos provetes um padrão de *speckle*, o qual foi ajustado à resolução da câmara para que este apresentasse um tamanho ideal de 4 a 6 píxeis. Este foi gerado, impresso numa impressora laser e transferido para a superfície do provete através da técnica de adesão. O processo de transferência é complexo e requereu a realização de vários ensaios até este estar afinado.

A realização dos ensaios na barra de Hopkinson requereu alguns cuidados na fase preparatória dos ensaios, nomeadamente na fixação dos provetes às amarras, na focagem, alinhamento e ajuste do campo de visão da câmara, na utilização de iluminação uniforme e abundante, na configuração dos diversos dispositivos, e na sincronização do ensaio com o sistema de registo do sinal dos extensómetros e das imagens de alta-velocidade. O pós-processamento dos sinais revelou ser um processo moroso, mas de fácil realização, recorrendo aos programas comerciais Sure-Pulse® e GOM®. Os sinais registados pelos extensómetros apresentavam algum ruído, o qual foi atenuado através da aplicação de um filtro passa-baixo, o que permitiu melhorar a qualidade das curvas tensão-deformação obtidas.

A informação obtida pela técnica de DIC revelou-se útil na identificação de desvios no carregamento dos provetes, o que permitiu a sua correção. Além disso, permite obter o campo de deformações gerado durante o carregamento do provete, cuja análise é importante para compreender o seu comportamento até à rutura.

Alguns dos ensaios tiveram de ser repetidos por que a rutura dos provetes ocorreu fora da região admissível ou porque ocorreu escorregamento entre o provete e a amarra. A análise das curvas tensão-deformação revelou que o comportamento dos provetes é fortemente dependente da direção de fabrico e que o tratamento térmico de revenido é eficaz no alívio das tensões residuais, a qual se traduz numa ligeira diminuição da tensão máxima e num aumento da extensão até à rutura. Para quantificar este aumento, foi determinada a energia elasto-plástica a partir das curvas tensão-deformação em cada. A sua análise confirma o que foi observado a partir das curvas tensão-deformação, que existe um aumento da energia elasto-plástica com a aplicação do tratamento térmico de revenido. Verifica-se, também, que os provetes fabricados na direção transversal possuem uma energia mais elevada, mesmo após tratamento térmico. Por esse motivo, considera-se ser esta a direção preferencial de impressão dos futuros provetes. A análise comparativa das curvas deformação-tempo, medidas pelas duas técnicas, mostra que ambas possuem o mesmo andamento, mas os valores obtidos para a técnica DIC são inferiores devido a esta não incluir a deformação do provete que ocorre dentro da amarra e sua taxa de amostragem ser substancialmente inferior à técnica de extensometria. No âmbito deste trabalho, verificou-se que a combinação da informação obtida pelas duas técnicas permite uma análise mais detalhada do comportamento dos materiais e, também, compreender melhor os seus mecanismos.

### **5.1. Proposta de trabalhos futuros**

No seguimento do trabalho já realizado é proposto o estudo do comportamento dos provetes obtidos com diferentes parâmetros de fabrico, com objetivo de identificar a influência de cada parâmetro e obter a combinação ótima. Também seria de elevado interesse, complementar este estudo com a análise de vazios criados pelo processo de fabrico e correlacionar a percentagem de vazios com o comportamento do provete.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. J. Ferreira, “Análise do Comportamento Dinâmico de Componentes Estruturais sob Solicitações Generalizadas,” 2003.
- [2] T. Nicholas, “Strain-rate and Strain-rate-history Effects in Several Metals in Torsion.”
- [3] W. Ming, J. Chen, Q. An, and M. Chen, “Dynamic mechanical properties and machinability characteristics of selective laser melted and forged Ti6Al4V,” *J Mater Process Technol*, vol. 271, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.015.
- [4] P. Ponnusamy, S. H. Masood, D. Ruan, and S. Palanisamy, “Effect of build orientation and elevated temperature on microhardness and deformation of dynamically tested SLM processed AlSi12 alloy,” *Mater Today Proc*, vol. 38, pp. 2488–2492, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.07.514.
- [5] X. Wang, R. Qin, and B. Chen, “Laser-based additively manufactured bio-inspired crashworthy structure: Energy absorption and collapse behaviour under static and dynamic loadings,” *Mater Des*, vol. 211, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110128.
- [6] L. Xiao, W. Song, M. Hu, and P. Li, “Compressive properties and micro-structural characteristics of Ti–6Al–4V fabricated by electron beam melting and selective laser melting,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 764, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.138204.
- [7] N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, “3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting,” *Progress in Materials Science*, vol. 106, 2019. doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
- [8] L. E. J. Thomas-Seale, J. C. Kirkman-Brown, M. M. Attallah, D. M. Espino, and D. E. T. Shepherd, “The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry,” *Int J Prod Econ*, vol. 198, pp. 104–118, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.IJPE.2018.02.003.
- [9] “IannGibsonn· DaviddRosen BrenttStucker Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition.”
- [10] E. Sachs, M. Cima, and J. Cornie, “Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model,” *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 39, no. 1, 1990, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61035-X.
- [11] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15, 2017. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [12] F. Calignano *et al.*, “Overview on additive manufacturing technologies,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 4, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [13] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, “Additive manufacturing of metals,” *Acta Mater*, vol. 117, pp. 371–392, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2016.07.019.
- [14] T. Kimura, T. Nakamoto, M. Mizuno, and H. Araki, “Effect of silicon content on densification, mechanical and thermal properties of Al-xSi binary alloys fabricated using selective laser melting,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 682, pp. 593–602, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.MSEA.2016.11.059.
- [15] L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, and J. P. Kruth, “A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V,” *Acta Mater*, vol. 58, no. 9, pp. 3303–3312, May 2010, doi: 10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.004.
- [16] Y. Zhu, J. Zou, X. Chen, and H. Yang, “Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316 L under lubricated conditions,” *Wear*, vol. 350–351, pp. 46–55, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.WEAR.2016.01.004.
- [17] Y. Lu *et al.*, “Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy,” *Opt Laser Technol*, vol. 75, pp. 197–206, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2015.07.009.

- [18] E. Liverani *et al.*, "Fabrication of Co–Cr–Mo endoprosthesis ankle devices by means of Selective Laser Melting (SLM)," *Mater Des*, vol. 106, pp. 60–68, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.MATDES.2016.05.083.
- [19] S. Scudino *et al.*, "Additive manufacturing of Cu–10Sn bronze," *Mater Lett*, vol. 156, pp. 202–204, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.MATLET.2015.05.076.
- [20] H. Attar *et al.*, "Effect of Powder Particle Shape on the Properties of In Situ Ti–TiB Composite Materials Produced by Selective Laser Melting," *J Mater Sci Technol*, vol. 31, no. 10, pp. 1001–1005, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.JMST.2015.08.007.
- [21] P. K. Gokuldoss, S. Kolla, and J. Eckert, "Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines," *Materials*, vol. 10, no. 6. MDPI AG, 2017. doi: 10.3390/ma10060672.
- [22] T. Kurzynowski, E. Chlebus, B. Kuźnicka, and J. Reiner, "Parameters in selective laser melting for processing metallic powders," in *High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications*, 2012. doi: 10.1117/12.907292.
- [23] N. T. Aboulkhair, "Additive manufacture of an aluminium alloy: processing, microstructure, and mechanical properties."
- [24] N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, "3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting," *Progress in Materials Science*, vol. 106. Elsevier Ltd, Dec. 01, 2019. doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
- [25] N. T. Aboulkhair, N. M. Everitt, I. Ashcroft, and C. Tuck, "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting," *Addit Manuf*, vol. 1–4, pp. 77–86, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.ADDMA.2014.08.001.
- [26] N. T. Aboulkhair, "Additive manufacture of an aluminium alloy: processing, microstructure, and mechanical properties."
- [27] N. T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, and N. M. Everitt, "On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties," *J Mater Process Technol*, vol. 230, pp. 88–98, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2015.11.016.
- [28] S. Pourhassan Shamchi and P. Miguel Guimarães Pires Moreira Paulo José da Silva Tavares, "High Strain Rate Behavior of Aerospace Materials," 2021.
- [29] "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets".
- [30] "A critical study of the hopkinson pressure bar".
- [31] H. Kolsky, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading."
- [32] J. M. Krafft, A. M. Sullivan, and C. F. Tipper, "The Effect of Static and Dynamic Loading and Temperature on the Yield Stress of Iron and Mild Steel in Compression," 1954.
- [33] J. L. Chiddister and L. E. Malvern, "Compression-impact Testing of Aluminum at Elevated Temperatures A split Hopkinson pressure-bar technique obtains stress-strain curves and stress vs. strain-rate relations for 1/4-in. long 1/2-in. diam specimens at six temperatures up to 550 °C."
- [34] J. Harding, E. O Wood, and J. D. Campbell, "TENSILE TESTING OF MATERIALS AT IMPACT RATES OF STRAIN."
- [35] "High Strain-rate Testing: Tension and Compression."
- [36] "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain."
- [37] W. E. Baker and C. H. Yew, "Strain-Rate Effects in the Propagation of Torsional Plastic Waves 1," 1966. [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [38] "K. A. Hartley, J. Duffy, and R. H. Hawley, 'The Torsional Kolsky (Split-Hopkinson) Bar,' in Mechanical Testing, ASM Handbook (9th edition), Metal Park, Ohio, 8, 1985, pp. 218–228."

- [39] J. J. DUFFY Professor of Engineering D CAMPBELL and S. Research Engineer, "R. H: HAWLEY On the Use of a Torsional Split Hopkinson Bar to Study Rate Effects in," 1971. [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [40] J. L. Lewis and J. D. Campbell, "The Development and Use of a Torsional Hopkinson-bar Apparatus."
- [41] R. A. Frantz, J. R. Research, and A. J. Duffy, "The Dynamic Stress-Strain Behavior in Torsion of 1100-0 Aluminum Subjected to a Sharp Increase in Strain Rate 1," 1972. [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [42] A. M. Eleiche and J. Duffy, "EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE STATIC AND DYNAMIC STRESS-STRAIN CHARACTERISTICS IN TORSION OF 1100-0 ALUMINUM\*," Pergamon Press, 1975.
- [43] Y. H. Paot and A. Gilat, "HIGH STRAIN RATE DEFORMATION AND FAILURE OF A533B STEEL AT VARIOUS TEMPERATURES," 1992.
- [44] R. K. Feng T Ramesh and S. Jahanmir, "The Rheology of Lubricants at High Shear Rates," 1993. [Online]. Available: <http://www.asme.org/about-asm>
- [45] U. S. Lindholm, "SOME EXPERIMENTS WITH THE SPLIT PRESSURE BAR\*," Pergamon Press Ltd, 1964.
- [46] "Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments," *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, vol. 435, no. 1894, pp. 371–391, Nov. 1991, doi: 10.1098/rspa.1991.0150.
- [47] B. A. Gama, S. L. Lopatnikov, and J. W. Gillespie, "Hopkinson bar experimental technique: A critical review," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 57, no. 1–6. pp. 223–250, Jan. 2004. doi: 10.1115/1.1704626.
- [48] J. E. Field, S. M. Walley, W. G. Proud, H. T. Goldrein, and C. R. Siviour, "Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies," in *International Journal of Impact Engineering*, Aug. 2004, pp. 725–775. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.005.
- [49] G. T. Gray Iii, "HIGH-STRAIN-RATE TESTING OF MATERIALS: THE SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR."
- [50] "M. A. Meyers, Dynamic behavior of materials," in *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, 1994, pp. 23–65. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470172278.ch2>.
- [51] M. Sutton, J.-J. Orteu, and H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*. 2009. doi: 10.1007/978-0-387-78747-3.
- [52] "Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics."
- [53] B. Pan, "Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals," *Meas Sci Technol*, vol. 29, no. 8, p. 82001, Jun. 2018, doi: 10.1088/1361-6501/aac55b.
- [54] P. R. T. Newby, "Photogrammetric Terminology: Second Edition," *Photogrammetric Record*, vol. 27, no. 139, pp. 360–386, Sep. 2012, doi: 10.1111/j.1477-9730.2012.00693. x.
- [55] "HISTORY OF PHOTOGRAMMETRY EARLY DEVELOPMENTS 1."
- [56] P. Reu, "DIC: A Revolution in Experimental Mechanics," *Experimental Techniques*, vol. 39, no. 6. Blackwell Publishing Inc., pp. 1–2, Nov. 01, 2015. doi: 10.1111/ext.12173.
- [57] W. H. Peters and W. F. Ranson, "Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis," *Optical Engineering*, vol. 21, no. 3, 1982, doi: 10.1117/12.7972925.
- [58] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, and S. McNeill, "Determination of displacements using an improved digital correlation method," *Image Vis Comput*, vol. 1, no. 3, 1983, doi: 10.1016/0262-8856(83)90064-1.
- [59] Y. Morimoto and M. Fujigaki, "Automated analysis of 3-D shape and surface strain distributions of a moving object using stereo vision," *Opt Lasers Eng*, vol. 18, no. 3, 1993, doi: 10.1016/0143-8166(93)90027-I.
- [60] P.-F. Luo, Y. J. Chao, and M. A. Sutton, "Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments," *Optical Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 981 – 990, 1994, doi: 10.1117/12.160877.

- [61] B. Pan, L. P. Yu, and Q. B. Zhang, "Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement," *Science China Technological Sciences*, vol. 61, no. 1. Springer Verlag, pp. 2–20, Jan. 01, 2018. doi: 10.1007/s11431-017-9090-x.
- [62] P. Reu, "All about speckles: Speckle density," *Exp Tech*, vol. 39, no. 3, 2015, doi: 10.1111/ext.12161.
- [63] P. Reu, "All about speckles: Speckle size measurement," *Exp Tech*, vol. 38, no. 6, 2014, doi: 10.1111/ext.12110.
- [64] P. Reu, "All about speckles: Edge sharpness," *Exp Tech*, vol. 39, no. 2, 2015, doi: 10.1111/ext.12139.
- [65] P. Reu, "All about speckles: Aliasing," *Exp Tech*, vol. 38, no. 5, 2014, doi: 10.1111/ext.12111.
- [66] B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review," *Meas Sci Technol*, vol. 20, no. 6, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/6/062001.
- [67] Correlated Solutions, "Application Note AN -1701 Speckle Pattern Fundamentals," *Speckle Pattern Fundamentals*, 2017.
- [68] Y. L. Dong and B. Pan, "A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation," *Exp Mech*, vol. 57, no. 8, 2017, doi: 10.1007/s11340-017-0283-1.
- [69] J. Davide and L. Rosas, "IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES NO PLANO PELA TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM."
- [70] "Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações".
- [71] P. Reu, "Hidden components of 3D-DIC: Interpolation and matching - Part 2," *Experimental Techniques*, vol. 36, no. 3. 2012. doi: 10.1111/j.1747-1567.2012.00838. x.

## 6. ANEXOS

### 6.1. Anexo 1 – Dimensões dos Provetes para ensaio na Barra de Hopkinson

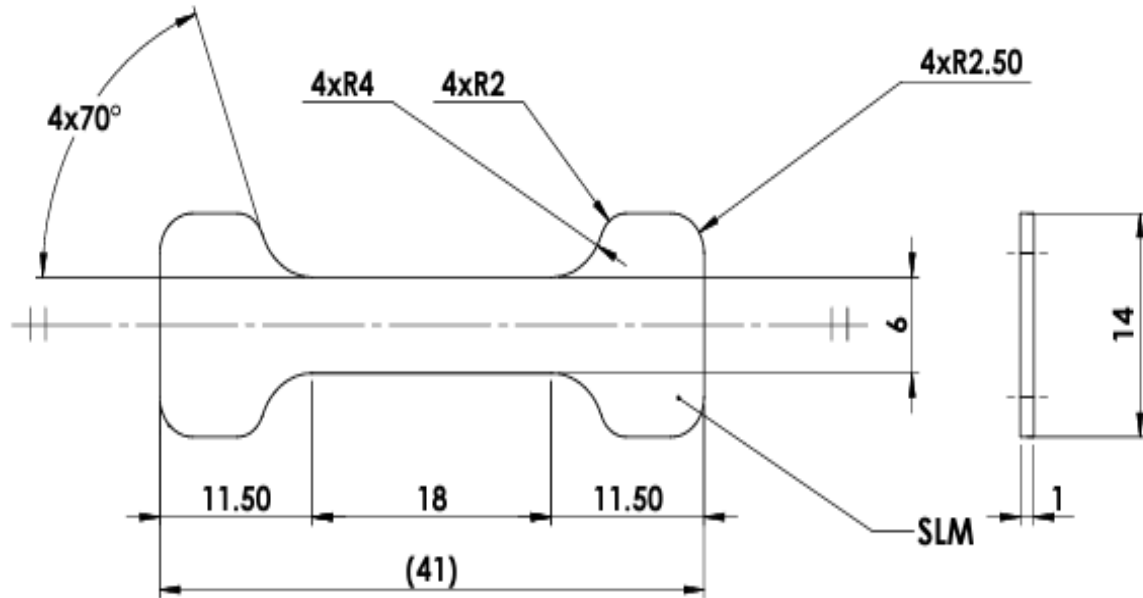


Figura 39 - Desenho técnico dos provetes utilizados nos ensaios da Barra de Hopkinson (desenho fornecido pelo INEGI)

## 6.2. Anexo 2 – Imagens de todos os provetes ensaiados

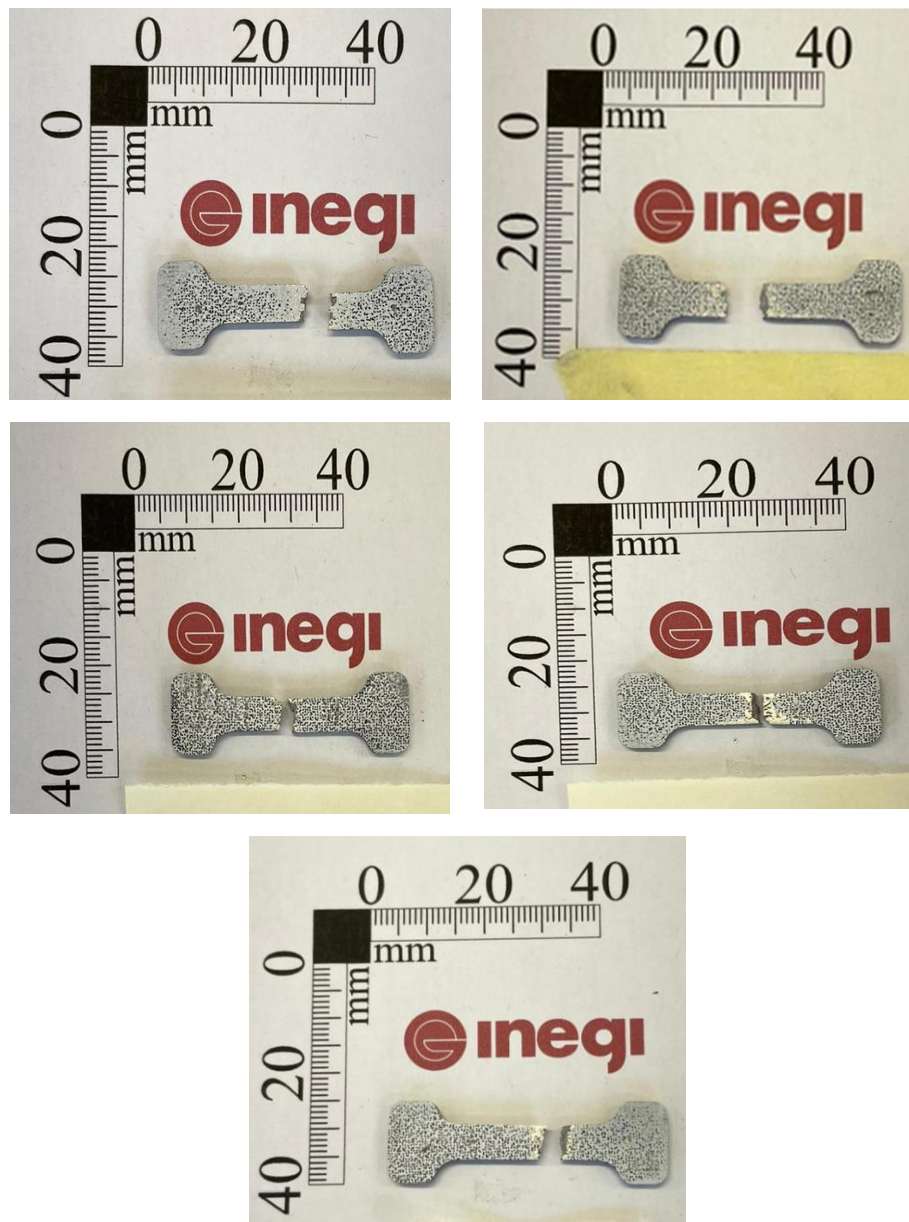


Figura 40 - Imagens dos provetes Verticais após o ensaio

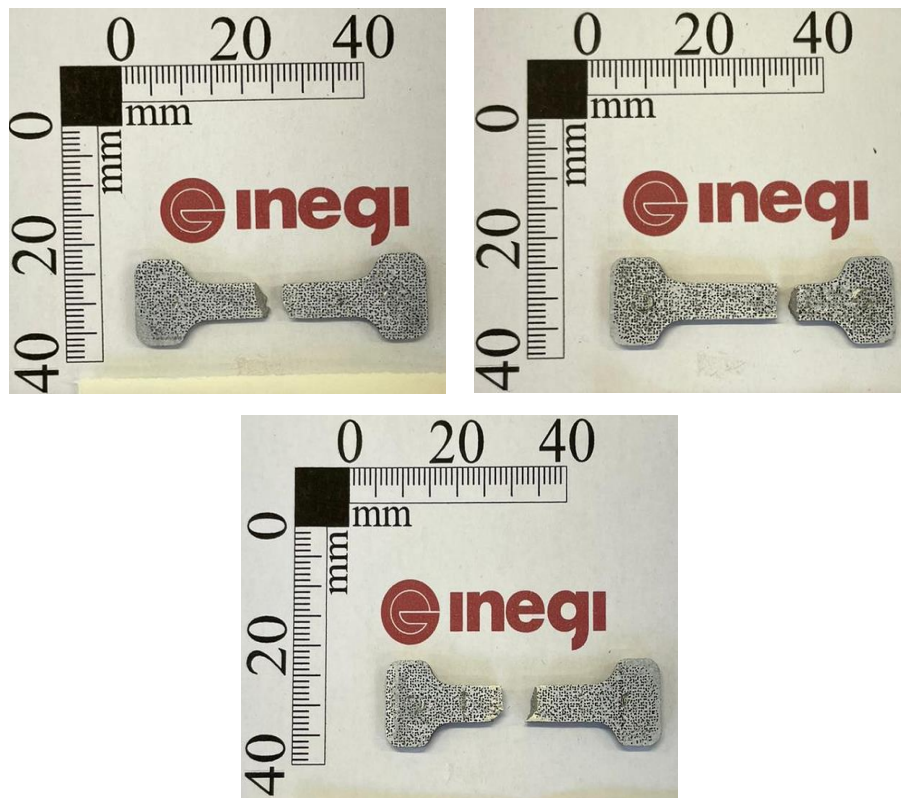


Figura 41 - Imagens dos provetes Verticais Tratados após o ensaio

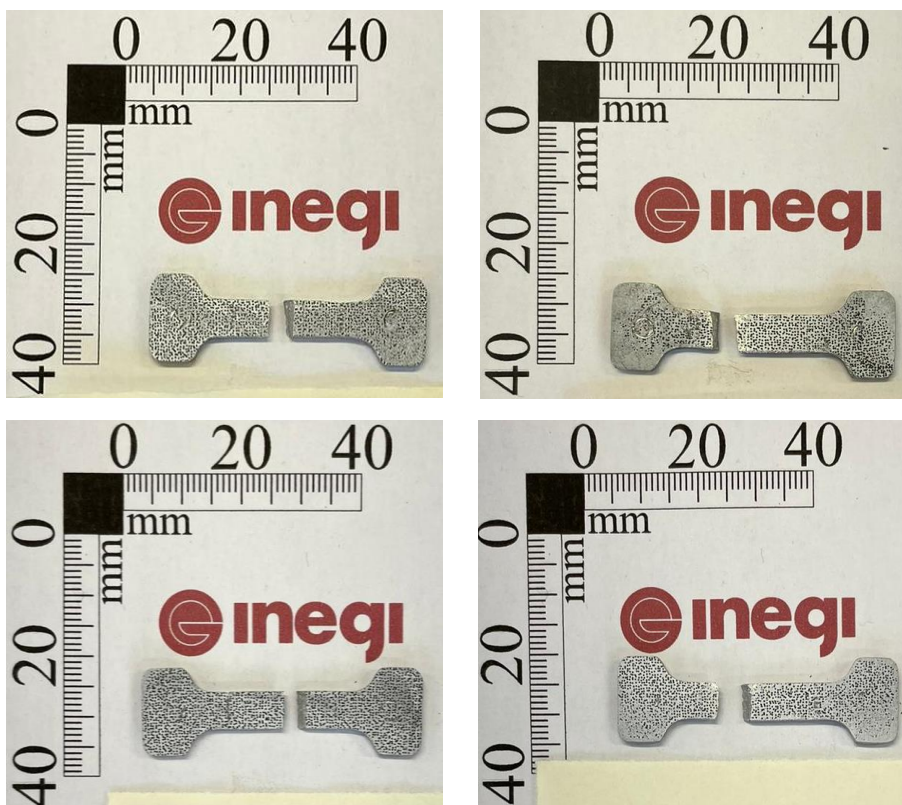


Figura 42 - Imagens dos provetes Transversais após o ensaio

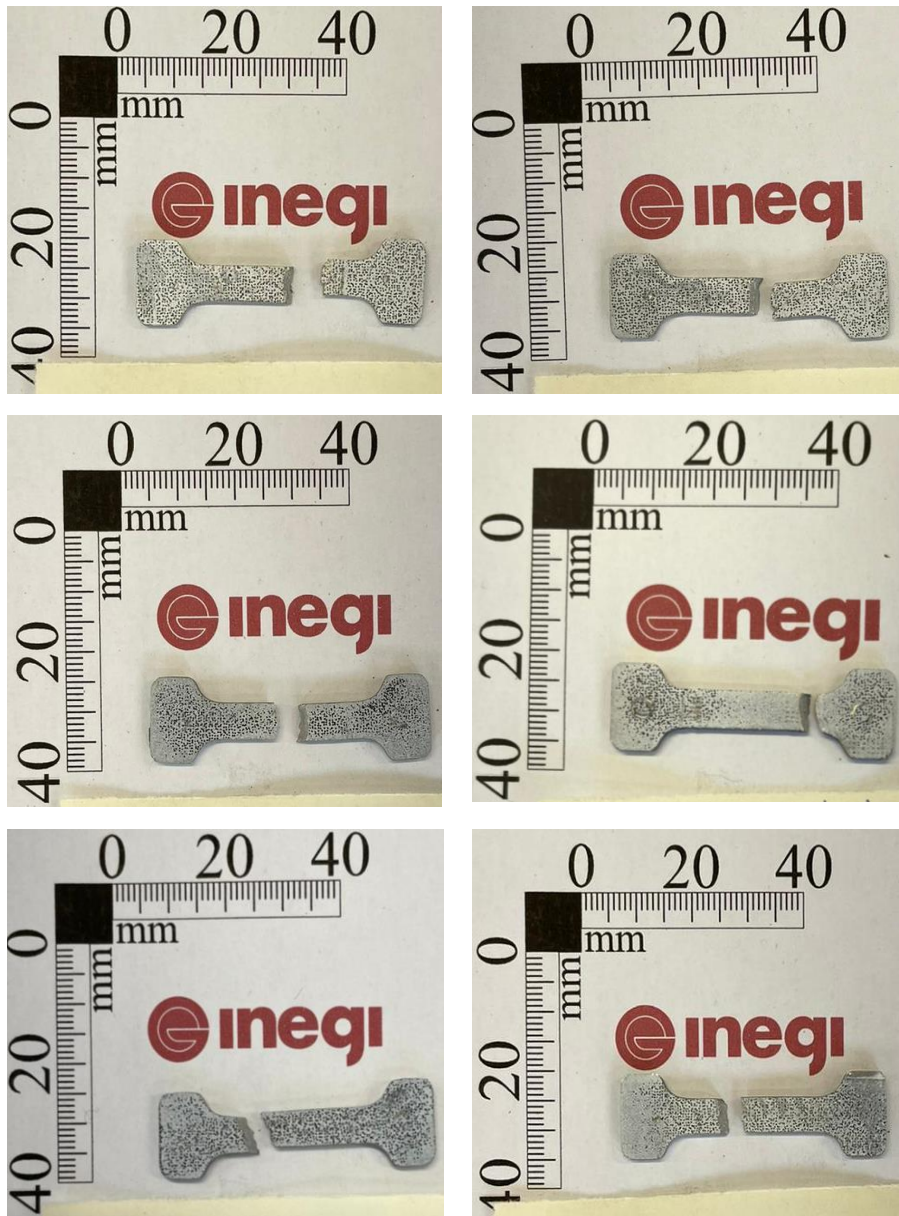


Figura 43 - Imagens dos provetes Transversais Tratados após o ensaio

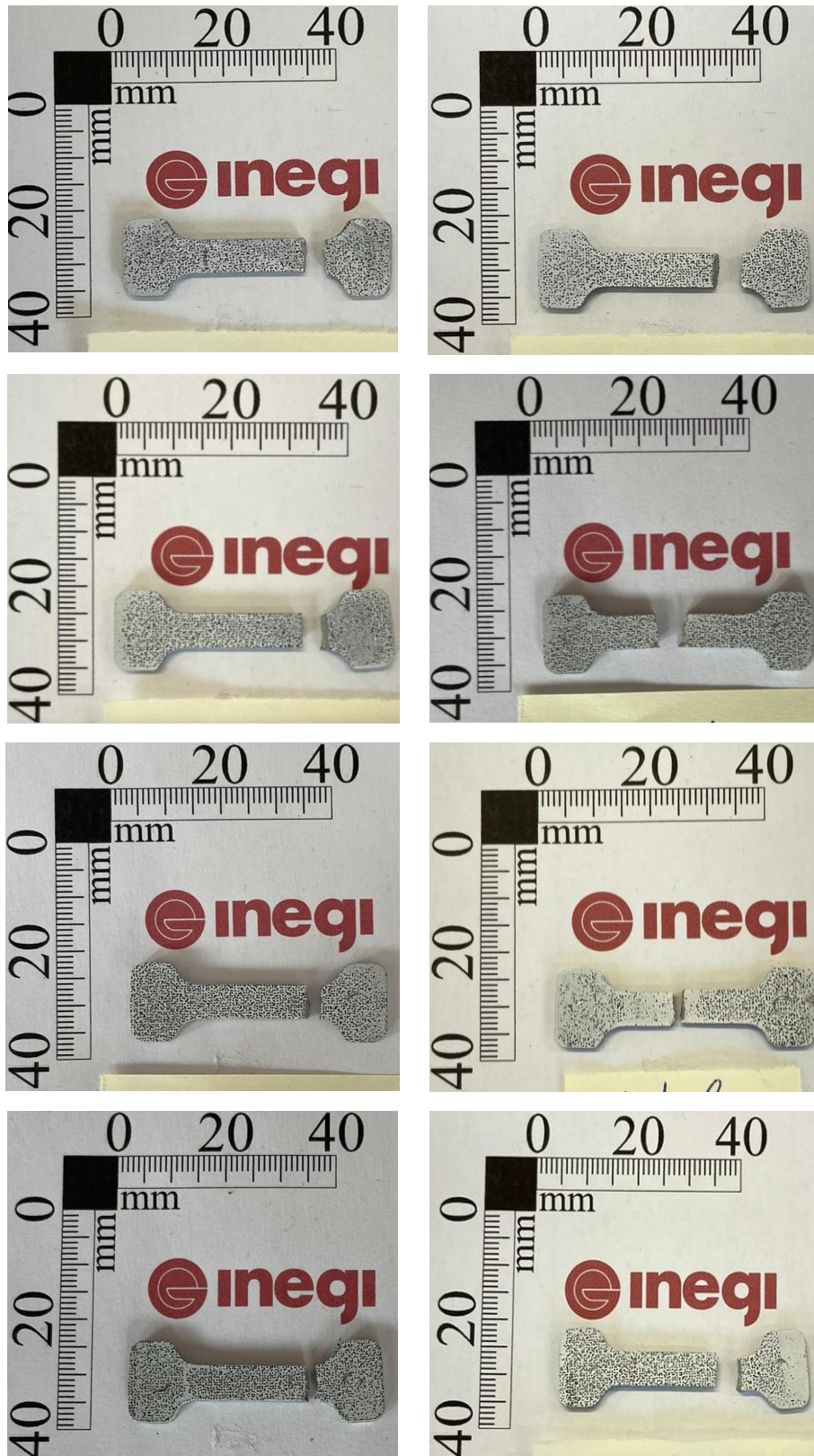


Figura 44 - Imagens dos provetes Longitudinais após o ensaio

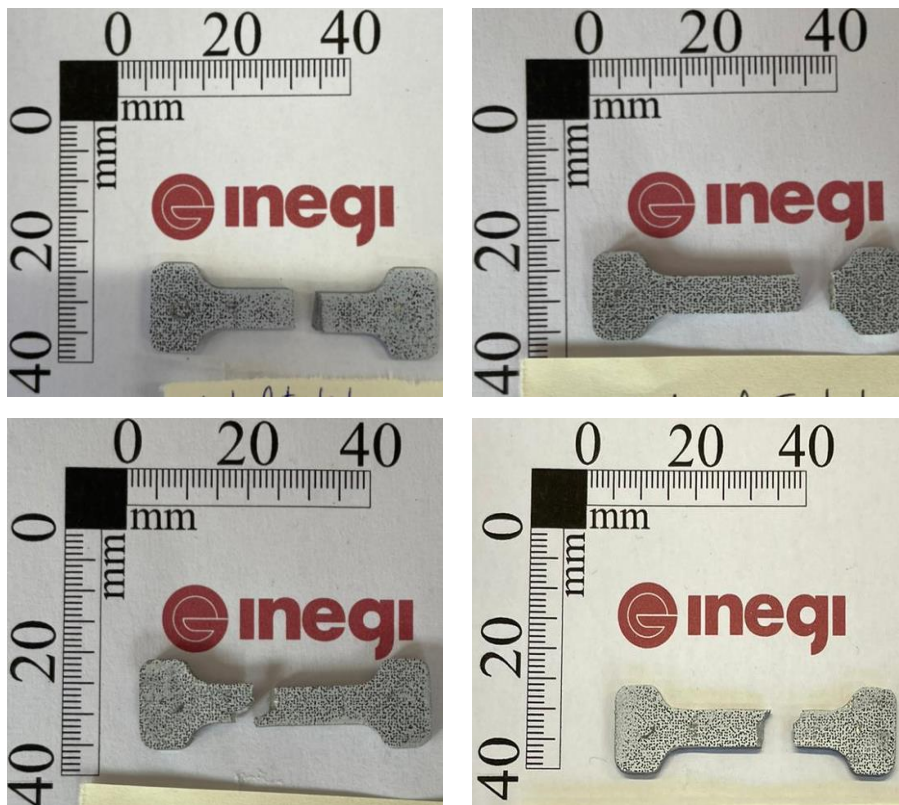


Figura 45 - Imagens dos provetes Longitudinais Tratados após o ensaio

### 6.3. Anexo 3 – Código MATLAB® referente ao programa de filtragem dos dados

```

clear all;close all;clc;warning off;
try
    load Path.mat
catch
    pathname=pwd;
end
[filename,pathname] = uigetfile({'*.txt'}...
    , 'Select the phase Map in X-diretion',pathname);
if isequal(filename,0)
    return
end
save Path.mat pathname
data = importfile(fullfile(pathname, filename));
Time=data(:,1);
Channel_C=data(:,2);
Channel_D=data(:,3);
fileID = fopen(fullfile(pathname,[filename(1:end-4)
'_filtrado.txt']), 'w');
fprintf(fileID, 'Time,Channel C,Channel D\n');
fprintf(fileID, ' (ms), (V), (V)\n');
fprintf(fileID, '\n');
figure;
%% filtragem
n_vezes=1000;
Janela=9;
Hw=ones(Janela,1)/Janela;
Channel_C_filtrado=Channel_C;
Channel_D_filtrado=Channel_D;
subplot(2,1,1);plot(Time,Channel_C); hold on;
subplot(2,1,2);plot(Time,Channel_D);hold on;

for i=1:n_vezes

    Channel_C_filtrado=imfilter(Channel_C_filtrado,Hw,0,'conv');
    Channel_D_filtrado=imfilter(Channel_D_filtrado,Hw,0,'conv');

end
subplot(2,1,1);plot(Time,Channel_C_filtrado,'r'); hold off;
subplot(2,1,2);plot(Time,Channel_D_filtrado,'r');hold off;

for i=1:size(Time,1)
fprintf(fileID, '%8.7f,%8.12f,%8.10f\n',Time(i),Channel_C_filtrado(
i),Channel_D_filtrado(i));
end
fclose(fileID);

```

```

function bVT4 = importfile(filename, startRow, endRow)
%IMPORTFILE Import numeric data from a text file as a matrix.
%   BVT4 = IMPORTFILE(FILENAME) Reads data from text file FILENAME
for the
%   default selection.
%
%   BVT4 = IMPORTFILE(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data from
rows
%   STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
%   bVT4 = importfile('2023051805_10b_VT4.txt', 3, 1000006);
%
%   See also TEXTSCAN.

% Auto-generated by MATLAB on 2023/06/29 15:37:04

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
if nargin<=2
    startRow = 3;
    endRow = inf;
end

%% Format for each line of text:
%   column1: double (%f)
%   column2: double (%f)
%   column3: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f%f%f%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to the format.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating
the code
% from the Import Tool.
textscan(fileID, '%[\n\r]', startRow(1)-1, 'WhiteSpace', '',
'ReturnOnError', false);
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'MultipleDelimsAsOne', true, 'TextType',
'string', 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine', '\r\n');
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    textscan(fileID, '%[\n\r]', startRow(block)-1, 'WhiteSpace',
'', 'ReturnOnError', false);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'MultipleDelimsAsOne',
true, 'TextType', 'string', 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine',
'\r\n');
    for col=1:length(dataArray)
        dataArray{col} = [dataArray{col};dataArrayBlock{col}];
    end
end

```

end

```
%% Close the text file.  
fclose(fileID);
```

```
%% Post processing for unimportable data.  
% No unimportable data rules were applied during the import, so no  
post  
% processing code is included. To generate code which works for  
% unimportable data, select unimportable cells in a file and  
regenerate the  
% script.
```

```
%% Create output variable  
bVT4 = [dataArray{1:end-1}];
```

#### 6.4. Anexo 4 – Código MATLAB® referente ao programa do cálculo da energia elasto-plástica

```

clear all;close all;clc;warning off;

[filename,pathname] = uigetfile({'*.csv'}...
    , 'Select the phase Map in X-diretion');
if isequal(filename,0)
    return
end

data = double(importfile_CSV(fullfile(pathname, filename)));
Tensao=data(:,2);
Deformacao=data(:,3);
Delta_Deformacao=diff(Deformacao);

figure;plot(Deformacao,Tensao)
Energial=sum((Tensao(2:end)+Tensao(1:end-1))*1e6/2.*Delta_Deformacao);
disp(['Energia de deformação elasto-plástica por unidade de
volume = ' num2str(Energial),'Joule/m^3'])
Energia2=sum((Tensao(2:end)+Tensao(1:end-1))*(6*2)/2.*(Delta_Deformacao*12*1e-3));
disp(['Energia de deformação elasto-plástica = ' num2str(Energia2)
,'Joule'])

function teste = importfile_CSV(filename, startRow, endRow)
%IMPORTFILE1 Import numeric data from a text file as a matrix.
%   TESTE = IMPORTFILE1(FILENAME) Reads data from text file
FILENAME for
%   the default selection.
%
%   TESTE = IMPORTFILE1(FILENAME, STARTROW, ENDROW) Reads data
from rows
%   STARTROW through ENDROW of text file FILENAME.
%
% Example:
%   teste = importfile1('teste.csv', 3, 9308);
%
%   See also TEXTSCAN.

% Auto-generated by MATLAB on 2023/06/29 16:48:13

%% Initialize variables.
delimiter = ',';
if nargin<=2
    startRow = 3;
    endRow = inf;
end

%% Format for each line of text:
%   column1: double (%f)
%   column2: double (%f)

```

```
% column3: double (%f)
% column4: double (%f)
% column5: double (%f)
% column6: double (%f)
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f%f%f%f%f%f*s%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to the format.
% This call is based on the structure of the file used to generate
this
% code. If an error occurs for a different file, try regenerating
the code
% from the Import Tool.
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', delimiter, 'TextType', 'string', 'HeaderLines',
startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine', '\r\n');
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, 'TextType', 'string',
'HeaderLines', startRow(block)-1, 'ReturnOnError', false,
'EndOfLine', '\r\n');
    for col=1:length(dataArray)
        dataArray{col} = [dataArray{col};dataArrayBlock{col}];
    end
end

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Post processing for unimportable data.
% No unimportable data rules were applied during the import, so no
post
% processing code is included. To generate code which works for
% unimportable data, select unimportable cells in a file and
regenerate the
% script.

%% Create output variable
teste = [dataArray{1:end-1}];
```